

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

MURILO MORAES DA SILVA

**A MULTIFUNCIONALIDADE DO COMPENSADOR SÉRIE
EM UMA MICRORREDE CA COM CONTROLE
CENTRALIZADO**

VITÓRIA
2020

MURILO MORAES DA SILVA

**A MULTIFUNCIONALIDADE DO COMPENSADOR SÉRIE EM UMA
MICRORREDE CA COM CONTROLE CENTRALIZADO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Murilo Moraes da Silva**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes

VITÓRIA
2020

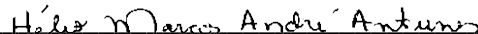
MURILO MORAES DA SILVA

**A MULTIFUNCIONALIDADE DO COMPENSADOR SÉRIE EM UMA
MICRORREDE CA COM CONTROLE CENTRALIZADO**

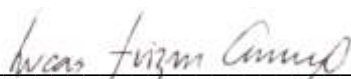
Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Murilo Moraes da Silva**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 18 de dezembro de 2020.


COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Dr. Lucas Frizera Encarnação
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador



MSc. Flávio Lopes da Silva
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador

Aos meus pais Valdi e Ludmara e ao meu irmão Vinícius.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Valdi e Ludmara, por todo o apoio prestado para que pudesse concluir este curso de engenharia elétrica na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. Hélio Marcos André Antunes, pela orientação e tempo dedicado para o desenvolvimento deste projeto.

Agradeço também ao Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo e a todos os profissionais da educação desta instituição de ensino pela oportunidade de estudar e, conseqüentemente, me graduar com alto grau de conhecimento e capacidade técnica e profissional.

RESUMO

Em uma microrrede CA, a introdução de um compensador série em sua operação pode ser vantajosa, de modo a garantir a qualidade da energia elétrica que é transferida pelo sistema e chega à carga. Uma das aplicações a ser analisada no presente trabalho é o comportamento do compensador série enquanto a rede de alimentação está presente, ou seja, quando a microrrede está conectada ao sistema elétrico proposto. Neste modo de operação, o dispositivo estudado se comportará apenas como um suporte à rede anteriormente citada, limitando-se a garantir uma compensação de tensão, quando forem detectados sua elevação ou afundamento, e também uma compensação harmônica, além de garantir a regulagem de tensão quando há cargas inseridas na microrrede. Uma outra aplicabilidade refere-se ao instante em que a rede encontra-se ausente, de modo que, a partir deste momento, o compensador série passe a atuar como formador de rede, sendo importante salientar que quando isto ocorre, a rede de alimentação está fora de operação e a microrrede muda sua operação para o modo ilhado. Para que seja possível essa configuração multifuncional, será desenvolvido, por meio de simulação computacional, um controle para o conversor, a fim de garantir uma transição suave entre os seus modos de operação.

Palavras Chaves: Microrrede. Conversor de suporte à rede. Conversor formador de rede. Compensador série. Conversor multifuncional.

ABSTRACT

In AC microgrids, the introduction of a series compensator in its operation can be advantageous, in order to guarantee the quality of the electrical energy that is transferred by the system and reaches the load. One of the applications to be analyzed in the present project is how the series compensator works while the main power supply is available, that means, when the microgrid is connected to the proposed electrical system, and, by this way, the studied device will work as a grid-supporting for the aforementioned main power supply, limiting itself to guaranteeing a voltage compensation, when a voltage swell or sag is detected, as well as harmonic compensation when its required to, besides ensuring voltage regulation when there are loads coupled to the microgrid. Another applicability refers to the moment when the main power supply is not available, then, from that moment, the series compensator starts to act as a grid-forming, and it is important to emphasize that when this occurs, the power grid is out of operation and the multifunctional converter is working as a grid-forming in the microgrid. In order to make this multifunctional configuration possible, a control for the converter will be developed, through a computer simulation, in order to guarantee a smooth transition between its operation's modes.

Keywords: Microgrid. Grid-supporting converter. Grid-forming converter. Series compensator. Multifunctional converter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração típica de uma microrrede CA com controle centralizado	15
Figura 2 – Configuração do conversor supridor de rede	21
Figura 3 – Configuração monofásica do conversor supridor de rede.....	21
Figura 4 – Controle monofásico do conversor supridor de rede	22
Figura 5 – Configuração do conversor formador de rede.....	22
Figura 6 – Conversor multifuncional conectado à rede elétrica.....	24
Figura 7 – Configuração para suprimento do barramento CC do compensador série por retificador a diodo.....	25
Figura 8 – Configuração para suprimento do barramento CC do compensador série por banco de baterias e conversor <i>buck-boost</i>	26
Figura 9 – Microrrede com centro de controle QEE	27
Figura 10 – O compensador série com múltiplas funções.....	27
Figura 11 – Configuração do conversor multifuncional.....	29
Figura 12 – Transições entre os modos de operação do conversor multifuncional.....	30
Figura 13 - Modos de operação do conversor multifuncional: (a) modo I; (b) modo II; (c) modo III; (d) modo IV	31
Figura 14 – Controlador CR em paralelo com controlador PI	34
Figura 15 – Diagrama por fase das grandezas elétricas para o controle do conversor.....	35
Figura 16 – Estrutura de controle implementada em coordenadas naturais	36
Figura 17 – Diagrama de Bode com filtro $F(s)$ e com filtro $F(s) + \text{avanço}$	37
Figura 18 – Diagrama de Bode da função de transferência de malha fechada.....	37
Figura 19 – Bloco de referência de tensão utilizado no conversor multifuncional	38
Figura 20 – Configuração da microrrede monofásica	42
Figura 21 – Formas de onda da tensão na rede (V_S) e no PAC da microrrede (V_{MR}) sem carga.....	44
Figura 22 – Formas de onda da tensão de referência (V_{ref}) gerada pelo compensador série e no capacitor do filtro LC (v_{oMC}).....	45
Figura 23 – Formas de onda da tensão na rede (V_S) e no PAC da microrrede (V_{MR}) com carga.....	46
Figura 24 – Formas de onda da tensão de referência (V_{ref}) gerada pelo compensador série e no capacitor do filtro LC (V_{oMC}).....	47
Figura 25 – Formas de onda da corrente na rede (I_S) e microrrede (I_{MR}) com carga	47

Figura 26 – Formas de onda da tensão na rede (V_S) e no PAC da microrrede (V_{MR}) com carga.....	49
Figura 27 – Formas de onda da tensão de referência (V_{ref}) gerada pelo compensador série e no capacitor do filtro LC (V_{oMC}).....	50
Figura 28 – Formas de onda da corrente na rede (I_S) e microrrede (I_{MR}) com carga	51
Figura 29 – Formas de onda da tensão na rede (V_S) e no PAC da microrrede (V_{MR}) com carga.....	52
Figura 30 – Formas de onda da tensão de referência (V_{ref}) gerada pelo compensador série e no capacitor do filtro LC (V_{oMC}).....	53
Figura 31 – Formas de onda da corrente na rede (I_S) e microrrede (I_{MR}) com carga	54
Figura 32 – Formas de onda da tensão (V_{MR}) e corrente (I_{MR}) na microrrede	55
Figura 33 – Formas de onda da corrente nas cargas linear e não linear (I_{load})	55
Figura 34 – Forma de onda da corrente do conversor supridor de rede (I_{CSR})	56
Figura 35 – Formas de onda da tensão na rede (V_S) e no PAC da microrrede (V_{MR}) com carga.....	57
Figura 36 – Formas de onda da tensão de referência (V_{ref}) gerada pelo compensador série e no capacitor do filtro LC (V_{oMC}).....	58
Figura 37 – Formas de onda da corrente na rede (I_S) e microrrede (I_{MR}) com carga	59
Figura 38 – Simulação para a microrrede no modo conectado	67
Figura 39 – Controle do conversor multifuncional	67
Figura 40 – Configuração da PLL utilizada	68
Figura 41 – Cargas linear e não linear acopladas à microrrede.....	68
Figura 42 – O conversor multifuncional no sistema elétrico proposto.....	68
Figura 43 – Simulação para a microrrede no modo conectado	69
Figura 44 – Bloco responsável pela detecção de ilhamento.....	69
Figura 45 – O conversor multifuncional no sistema elétrico proposto.....	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros elétricos da microrrede	43
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCMR	Centro de Controle da Microrrede
CE	Chave Estática
CL	Controlador Local
CR	Controle Repetitivo
CSR	Conversor Supridor de Rede
FPB	Filtro Passa Baixa
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
P	Controlador Proporcional
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PI	Controlador Proporcional-Integral
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>
PQ	Potência Ativa e Reativa
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UPS	<i>Uninterruptable Power Supply</i>
VTCD	Varição de Tensão de Curta Duração

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Tensão (V)
f	Frequência (Hz)
Z_S	Impedância série (Ω)
$V_S(t)$	Tensão da fonte (V)
t	Tempo (s)
R	Valor da resistência do resistor (Ω)
C	Valor da capacitância do capacitor (F)
L	Valor da indutância do indutor (H)
$I_S(t)$	Corrente da fonte (A)
$V_{ref}(t)$	Tensão de referência (V)
f_{sw}	Frequência de chaveamento (Hz)
I_{MR}	Corrente na microrrede (A)
V_{MR}	Tensão na microrrede (V)
I_{NL}	Corrente na carga não linear (A)
V_{NL}	Tensão na carga não linear (V)
I_L	Corrente na carga linear (A)
V_L	Tensão na carga linear (V)
H_i	Sensor de corrente
H_v	Sensor de tensão
K_{rv}	Ganho do controle repetitivo da malha de tensão
K_{pi}	Ganho do proporcional da malha de corrente
K_{pv}	Ganho do proporcional da malha de tensão
K_{iv}	Ganho do integrativo da malha de tensão
Y (s)	Sinal de saída
E (s)	Sinal de entrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivo Geral	16
1.3	Objetivos Específicos	16
1.4	Metodologia	16
1.5	Organização do Trabalho	17
2	MICRORREDES	18
2.1	Conceitos Básicos de Microrredes	18
2.1.1	Os Modos de Operação da Microrrede.....	19
2.1.2	Os Conversores Eletrônicos nas Microrredes.....	20
2.2	Os Conversores Multifuncionais	23
2.3	O Compensador Série	24
2.4	O Compensador Série nas Microrredes	26
2.5	Comentários sobre Microrredes	28
3	O CONVERSOR MULTIFUNCIONAL	29
3.1	Topologia do Conversor Multifuncional	29
3.2	Principais Modos de Operação e Transição do Conversor Multifuncional.	30
3.3	Projeto e Controle do Conversor Multifuncional	32
3.3.1	Projeto do Filtro LC.....	32
3.3.2	O Controle Repetitivo.....	33
3.3.3	Controle de Tensão do Conversor Multifuncional	35
3.3.4	Referência de Tensão.....	38
3.4	Comentários sobre o Conversor Multifuncional	39
4	ESTUDO DE CASO	41
4.1	A Microrrede em Estudo	41
4.2	Cálculo dos Componentes do Filtro LC	43
4.3	Cenário I – Filtro Ativo Série e Modo Conectado	43
4.3.1	Conversor como Filtro Ativo Série Sem Carga.....	44
4.3.2	Conversor como Filtro Ativo Série com Carga	45
4.4	Cenário II – Transição do Modo Conectado para o Modo Ilhado	48

4.4.1	Transição do Modo Conectado à Rede para o Modo Ilhado de Maneira Intencional ...	48
4.4.2	Transição do Modo Conectado à Rede para o Modo Ilhado de Maneira Não Intencional.....	51
4.5	Cenário III – Operação no Modo Ilhado	54
4.6	Cenário IV – Reconexão do Modo Ilhado para o Modo Conectado e Black-Start	56
4.7	Comentários sobre os Estudos de Caso.....	59
5	CONCLUSÕES	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
	APÊNDICE A – SIMULAÇÕES UTILIZADAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro foi sendo desenvolvido, ao longo do tempo, pautado sobre o modelo centralizado de produção de energia elétrica. Este remete à utilização de grandes fontes geradoras de energia como termelétricas ou hidroelétricas, sendo esta a predominante no Brasil (SILVA, 2011). Entretanto, a configuração estrutural necessária para a sustentação desse modelo de produção de energia demanda alto grau de investimentos nos setores de transmissão e distribuição (MEDINA et al., 2014; SHARKH et al., 2014).

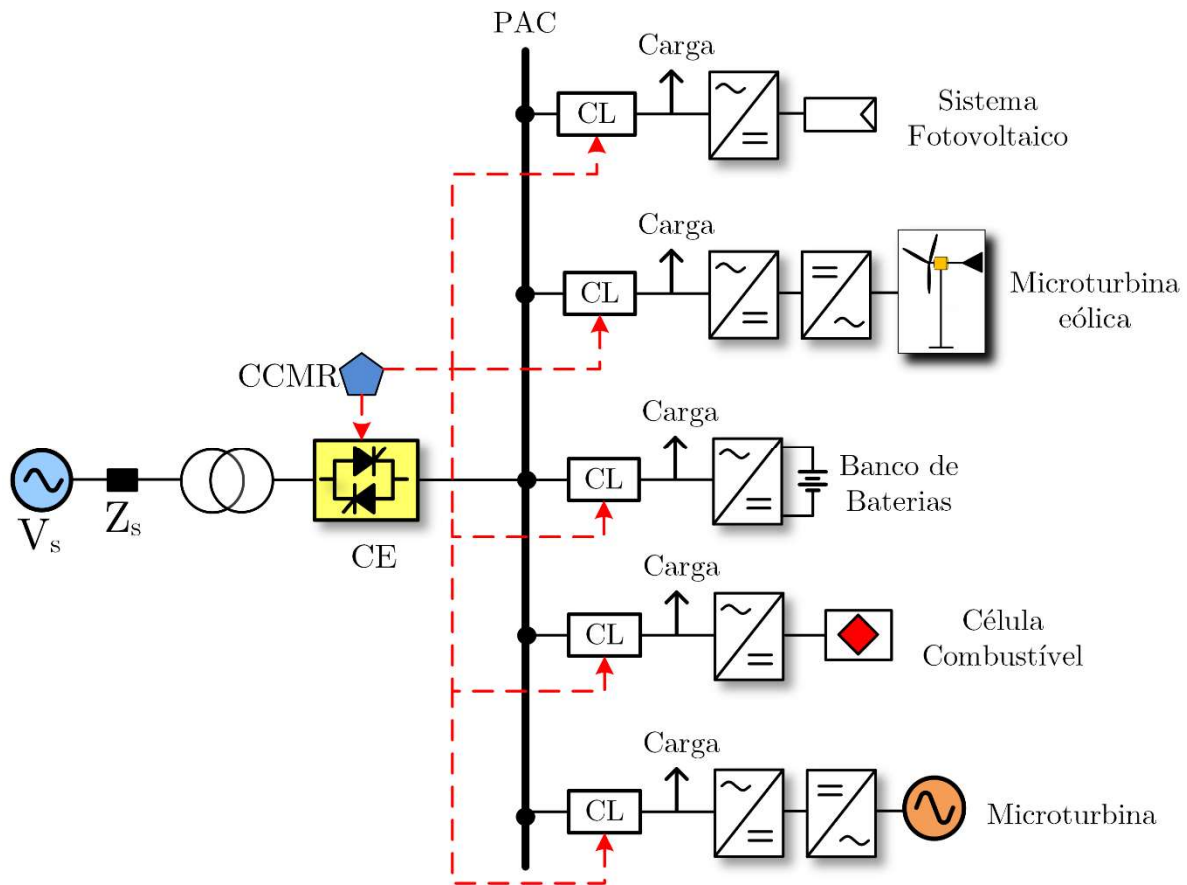
Com o decorrer do tempo, a descentralização dos sistemas de produção de energia elétrica tem se intensificado no país, reduzindo as potências geradas e trazendo os centros geradores para próximo dos consumidores. Tais mudanças ocorrem pautadas sobre argumentos econômicos, técnicos e ambientais (MIYAGI et al., 2014), mas com amplo respaldo de melhorias tecnológicas no que tange ao avanço da Eletrônica de Potência. Além disso, também foram preponderantes para o desenvolvimento e ampliação da geração distribuída no Brasil (FERREIRA et al., 2015).

A inserção de geração distribuída nos sistemas elétricos de baixas tensões no Brasil introduziu um novo conceito, denominado microrrede, que é um conjunto de microfontes de geração de energia e cargas elétricas somadas a elementos armazenadores de energia controlados por uma unidade central (LASSETER, 2002).

Uma configuração de microrrede de corrente alternada (CA) é apresentada na Figura 1, onde estão presentes, além da fonte de alimentação do sistema, diversas microfontes e um conversor com sistema de armazenamento com banco de baterias do tipo estacionária. O conversor eletrônico presente no sistema apresenta três configurações usuais a saber: o de supridor de rede, que opera injetando potência ativa na rede; o formador de rede, que atua como fonte de tensão controlada no modo V-f (tensão-frequência) suprindo cargas elétricas no modo ilhado (LOPES; MOREIRA; MADUREIRA, 2006; XU; MIAO; FAN, 2012); e o de suporte à rede, que é responsável por prover serviços ancilares para a microrrede, como regulação de tensão e frequência, afundamento de tensão e filtragem harmônica (ANTUNES, 2018).

Desse modo, este projeto busca apresentar a concepção de uma nova topologia de conversor eletrônico que agregue, em uma única estrutura, dois conversores básicos das microrrede (suporte à rede e formador de rede), podendo, dessa maneira, proporcionar grandes benefícios para a operação do sistema elétrico.

Figura 1 – Configuração típica de uma microrrede CA com controle centralizado



Fonte: Patrao e outros (2015).

1.1 Justificativa

O compensador série, que será utilizado como conversor multifuncional neste trabalho, tem se destacado por sua utilização em microrredes, pois, além de garantir a alimentação da carga durante sua atuação como formador de rede no modo ilhado, ele provê serviços ancilares quando a rede de alimentação encontra-se presente permitindo, desse modo, melhorar a qualidade da energia elétrica do sistema.

Desse modo, é evidente o papel fundamental desenvolvido pelo compensador série no sistema de microrredes. Entretanto, sua utilização em série no sistema ainda consta de modo pouco explorado pelas literaturas atuais. Portanto, este presente trabalho tem por intuito explorar sua configuração e comprovar sua aplicabilidade, tanto como suporte à rede, quanto como formador de rede.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é integrar o compensador série em uma microrrede CA com controle centralizado, agregando a função de suporte à rede e de formador de rede em um único conversor, de modo a garantir a qualidade da energia elétrica que chega à carga.

1.3 Objetivos Específicos

A seguir são enumerados os objetivos específicos deste trabalho:

- Desenvolver e modelar os parâmetros do compensador série a serem utilizados no sistema para garantir a melhor resposta possível do conversor;
- Criar um sistema de controle centralizado da microrrede, do tipo mestre-escravo, de modo a garantir a atuação do compensador série nas funções supracitadas;
- Montar e preparar um controle para o conversor multifuncional que garanta um chaveamento suave entre todos os seus modos operacionais, inclusive durante as transições na microrrede.

1.4 Metodologia

Este trabalho, do ponto de vista de sua natureza, é uma pesquisa aplicada, de modo a realizar a aplicação prática de um conversor multifuncional em uma microrrede CA de geração distribuída e controle centralizado. No que diz respeito ao objetivo do estudo, trata-se de uma pesquisa explicativa, tendo em vista que o conversor multifuncional é desenvolvido de modo a identificar fatores que causam a degradação da energia elétrica na rede e, conseqüentemente, compensá-los para serem entregues dentro dos padrões adequados à microrrede. Em relação aos procedimentos técnicos, é uma pesquisa experimental, onde são determinados o objeto de

estudo e as variáveis de influência, ao mesmo tempo em que são definidas as formas de controle e observações dos seus efeitos. Por fim, a abordagem deste estudo foi feita de maneira quantitativa.

1.5 Organização do Trabalho

Este projeto está organizado em cinco seções. Na seção 2, é apresentado todo o referencial teórico no que tange às microrredes, desde a sua estruturação até os seus modos de operação. Nele também é descrito o funcionamento do conversor eletrônico na composição das microrredes. Por fim, é exibido o funcionamento de um compensador série de tensão e sua atuação no sistema de energia proposto.

Na seção 3 será exposta a composição do conversor multifuncional, com os componentes necessários para seu funcionamento. Nele também serão mostrados os modos de operação e as transições que o conversor pode assumir durante seu funcionamento. Posteriormente, serão mapeados e determinados os componentes necessários de controle do sistema, como as variáveis a serem utilizadas com os ganhos dos controladores, as grandezas determinadas para a composição do filtro LC a ser utilizado no controle da tensão de referência do sistema e, além disso, as opções cabíveis para o referencial de tensão do sistema proposto.

Na seção 4 serão apresentados os resultados obtidos em todos os cenários analisados neste trabalho, contemplando tanto as configurações, descritas anteriormente, do conversor multifuncional quanto o comportamento das grandezas elétricas do sistema, desde a fonte de alimentação primária até o comportamento das cargas inseridas. Por fim, na seção 5 serão evidenciadas as conclusões finais relativas ao projeto elaborado.

2 MICRORREDES

Nesta seção são expostos, primeiramente, os conceitos básicos de funcionamento de uma microrrede e seus principais componentes e arquitetura. Posteriormente a isso, são detalhados os modos de operação da microrrede a ser estudada neste projeto. Então, será introduzido ao contexto deste estudo o conversor multifuncional e suas atribuições. Sendo finalizada a exposta seção com a apresentação do compensador série de tensão e suas funcionalidades, bem como sua introdução à microrrede.

2.1 Conceitos Básicos de Microrredes

A Figura 1 ilustra a arquitetura básica de uma microrrede CA que, segundo Vechiu e outros (2011), é composta por uma conexão radial de diversos alimentadores, com associação de cargas elétricas e diversas microfontes ligadas em um barramento de baixa tensão (BT) (LASSETER, 2001; LASSETER, 2002; BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014; IEEE STANDARDS COORDINATING, 2011).

Os principais componentes das microrredes se resumem ao centro de controle da microrrede (CCMR), à chave estática (CE), às microfontes e aos controladores locais (CL) presentes em cada carga elétrica e nas microfontes

O CCMR controla as cargas elétricas, os sistemas de armazenamento de energia e as microfontes de geração distribuída (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014). Além disso, é responsável por definir as potências ativa e reativa despachadas pelas microfontes, controlando, também, a tensão e frequência no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) em BT.

A CE é responsável por permitir a operação da microrrede tanto no modo conectada à rede quanto no modo ilhado, de modo a garantir que não haja interrupções da energia elétrica para as cargas elétricas (POPOV et al., 2009). É importante salientar que o controle da CE é realizado pelo CCMR.

As microfones são determinadas como sendo fontes de energia elétrica, com potência entre 1kW e 10MW, que se localizam em regiões próximas ao local de utilização dessa energia elétrica (ANTUNES; SILVA; CARDOSO FILHO, 2016).

O CL define a demanda da carga do circuito, determinando, desse modo, a produção e armazenamento de energia elétrica na microrrede. Seu controle, assim como na CE, é feito por meio do CCMR (ANTUNES, 2018).

Por fim, a arquitetura de controle mestre-escravo utilizada neste trabalho, também conhecida como *single-master operation* (SMO), garante o controle do sistema de modo centralizado. No modo de operação ilhado, o formador de rede é o mestre com controle V-f, enquanto que, quando a rede de alimentação encontra-se presente, o mestre opera como uma fonte de corrente, esperando o instante em que entrará em operação. É válido destacar que o CCMR é responsável por garantir uma rápida transição do modo de funcionamento do formador de rede, permitindo uma operação do sistema livre de transitórios (WANG et al., 2012; ARAFAT et al., 2012).

2.1.1 Os Modos de Operação da Microrrede

As microrredes apresentam quatro modos de operação, sendo eles:

- Modo conectado à rede elétrica principal;
- Modo ilhado;
- Modo de transição;
- *Black-start*.

O modo conectado à rede impõe à microrrede que opere nas condições de tensão e frequência da rede elétrica principal, permitindo que a microrrede injete energia na rede ou supra, total ou parcialmente, as cargas do sistema. As condições necessárias para esta configuração são que o CCMR esteja ativo, garantindo o recebimento das informações das cargas e das microfones, e que os inversores das microfones estejam operando no modo PQ (potência ativa e reativa), com controle em modo fonte de corrente (LOPES; MOREIRA; MADUREIRA, 2006).

Para que a microrrede opere no modo ilhado, é necessária a associação de pelo menos um inversor eletrônico, operando como fonte de tensão controlada, de modo a garantir a

manutenção da tensão e frequência na rede (HOJO et al., 2008). Enquanto isso, os outros inversores, operam, de modo a controlar as potências ativa e reativa e otimizar a geração da energia do sistema, no modo PQ.

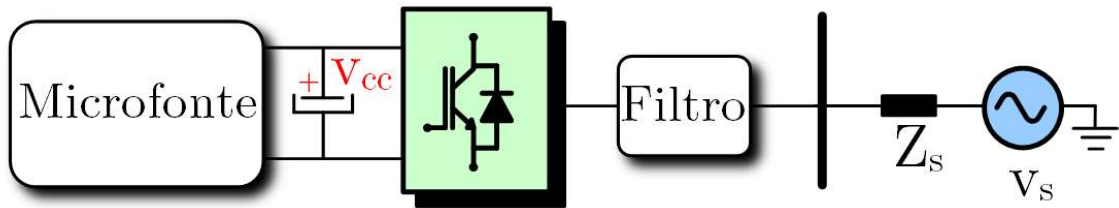
O modo de transição tem por finalidade garantir um chaveamento rápido e eficaz entre os modos conectado à rede e ilhado, visando evitar a presença de transitórios e garantindo os valores de tensão e frequência dentro de parâmetros normalizados. Existem dois casos de ocorrência de ilhamento, sendo eles o intencional e o não-intencional. Em ambos os casos, o CCMR da microrrede possui uma técnica alocada que permite a detecção do ilhamento, onde, o mesmo envia um sinal de controle forçando o inversor com elemento armazenador de energia a operar com controle V-f, o que garante o serviço contínuo promovido pela microrrede (BELTRAN et al., 2006).

Por fim, quando alguma eventualidade ocorre e a microrrede não consegue isolar-se, ela deve ser desativada. Para a retomada de seu funcionamento, a estratégia utilizada é o *black-start*, que controla o fluxo de potência, tensão e frequência da microrrede, sendo o elemento armazenador de energia o responsável por manter o balanço e potência e os valores de tensão e frequência adequados na microrrede (SOSHINSKAYA et al., 2014).

2.1.2 Os Conversores Eletrônicos nas Microrredes

Uma das funcionalidades de um conversor elétrico de potência no contexto das microrredes de energia é o supridor de rede. Quando o conversor possui essa funcionalidade, ele é responsável por converter a energia produzida por alguma microfonte e entregá-la à rede principal. Além disso, o conversor atua sincronizado à rede, o que permite que ele injete potência ativa e reativa na rede. Desse modo, a rede elétrica enxerga esse conversor como sendo uma fonte de corrente, com alta impedância de entrada. A composição do conversor com função de supridor de rede é ilustrada na Figura 2 (ANTUNES, 2018).

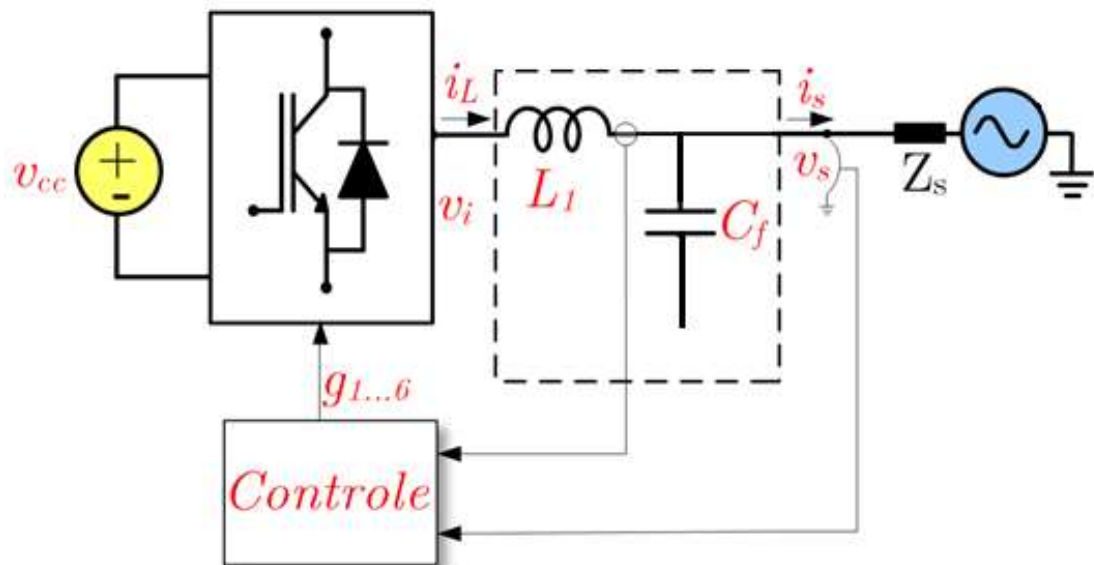
Figura 2 – Configuração do conversor supridor de rede



Fonte: Antunes (2018).

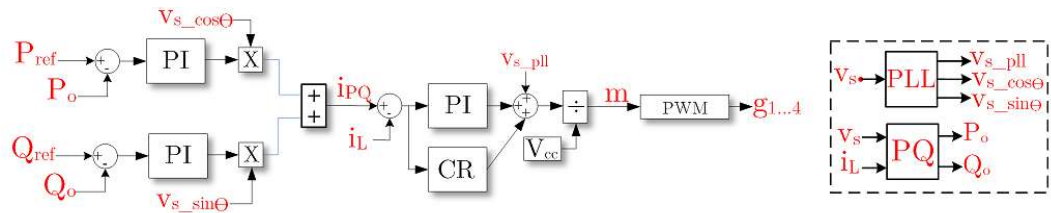
A Figura 3 exibe o conversor supridor de rede com uma configuração monofásica. A Figura 4 apresenta o controle do conversor em coordenadas naturais (abc) para a fonte de corrente monofásica, operando em malha fechada para as potências ativa e reativa, com um controlador proporcional-integral (PI). Além disso, utiliza-se um dispositivo que gera um *loop* de fase travada (PLL, do inglês *phase locked loop*) para sincronizar o conversor com a rede elétrica, por meio do sinal v_s_PLL e para gerar as variáveis $v_s_cos\theta$ para o componente em eixo direto de corrente e $v_s_sin\theta$ para a quadratura. E, por fim, utiliza-se, na malha de corrente, uma estrutura de controle PI em paralelo com o controle repetitivo (CR), para garantir o rastreamento com erro nulo para a entrada periódica.

Figura 3 – Configuração monofásica do conversor supridor de rede



Fonte: Antunes (2018).

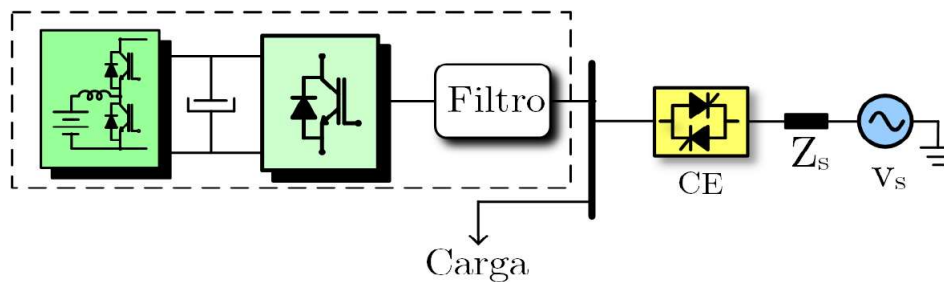
Figura 4 – Controle monofásico do conversor supridor de rede



Fonte: Antunes (2018).

Outra configuração possível para o conversor eletrônico de potência é a de formador de rede, que ocorre sempre que a rede elétrica principal se encontra em falha ou operando em modo ilhado. Diferentemente da configuração apresentada anteriormente, a figura do banco de baterias e da chave estática ganham destaque relevante para garantir tal modo de operação. Como o sistema encontra-se sem referência, inviabilizando a atuação do conversor como supridor de rede, este passa a ser controlado como fonte de tensão, atuando em malha fechada e impondo tensão e frequência de referência para o sistema. Desse modo, é válido salientar que, quando o conversor apresenta essa configuração, seu funcionamento assemelha-se ao de uma fonte de alimentação ininterrupta (UPS, do inglês *uninterruptable power supply*). A composição do conversor com função de formador de rede é ilustrada na Figura 5 (ANTUNES, 2018).

Figura 5 – Configuração do conversor formador de rede



Fonte: Antunes (2018).

A terceira configuração é para o conversor eletrônico que tem como função promover serviços ancilares às microrredes, ou seja, garantir a regulação de tensão e frequência da rede por meio do controle de potência ativa e reativa produzida ou absorvida na saída do conversor. Além disso, esta configuração também pode proporcionar a compensação de harmônicos e afundamentos de tensão (AZEVEDO et al., 2014). Seu modo de implementação neste trabalho será como fonte de tensão (ANTUNES, 2018).

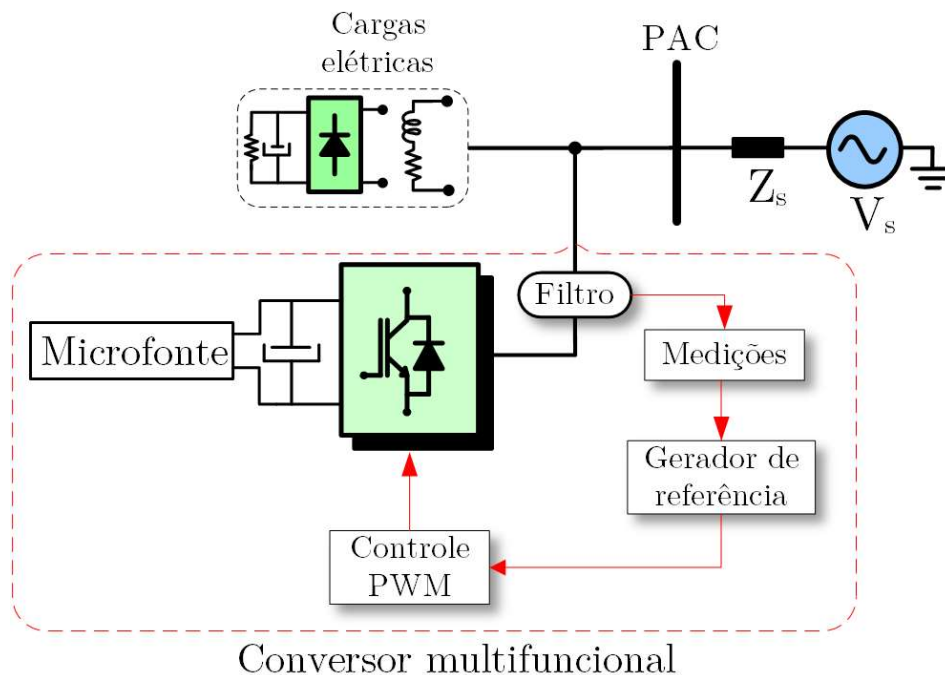
2.2 Os Conversores Multifuncionais

Os conversores multifuncionais baseados nos Inversores do tipo fonte de tensão (VSIs, do inglês *voltage source inverters*) têm sido amplamente difundido nas aplicações em microrredes, devido ao fato de que, o mesmo dispositivo aplicado na geração distribuída, operando como supridor de rede, pode receber múltiplas funcionalidades de suporte à rede apenas com algumas adaptações em seu controle. Sendo possível, desse modo, além de melhorar a qualidade da energia elétrica do sistema, reduzir a quantidade de conversores presentes no sistema (MIVEH et al., 2015).

Os filtros ativos têm sido utilizados nos sistemas elétricos tradicionais com a funcionalidade de compensação de fenômenos que venham a degradar a forma de onda de tensão do sistema elétrico. Eles podem ser conectados em série ou em paralelo ao sistema, sendo que apenas a primeira conexão é utilizada nesse trabalho. Desse modo, é válido salientar que, quando o filtro ativo opera conectado em série com a rede elétrica, ele opera como uma fonte de tensão controlada, eliminando ou reduzindo as variações de tensão de curta duração (VTCDs) como afundamentos momentâneos de tensão, elevações momentâneas de tensão e harmônicos de tensão na rede.

O conversor multifuncional, portanto, ao ser conectado em série à rede elétrica atuando como um filtro ativo série que pode assumir a função de suporte à rede, garantindo a compensação de VTCDs. Entretanto, ao acrescentar-se um banco de baterias ao conversor utilizado, ele consegue agregar a função de formador de rede quando a microrrede estiver no modo ilhado, ou seja, quando houver a falta da rede de alimentação principal, emulando, desse modo, uma rede elétrica. É válido salientar que essa última configuração garante ao conversor multifuncional a atuação como de uma UPS (HAN et al., 2013), como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Conversor multifuncional conectado à rede elétrica



Fonte: Teke e Latran (2014).

2.3 O Compensador Série

O compensador série possui como principal função a manutenção da qualidade da energia elétrica que é transmitida à carga do sistema. A partir disso, sua atuação abrange tanto a compensação de afundamentos de tensão, que acaba por contribuir na minimização de tensões transitórias e harmônicas no sistema, quanto a compensação de elevações de tensão. É válido salientar que ambos os degradadores de tensão supracitados são classificados como VTCDs, tendo tempo de duração entre um ciclo da fundamental e três minutos (ANEEL, 2016).

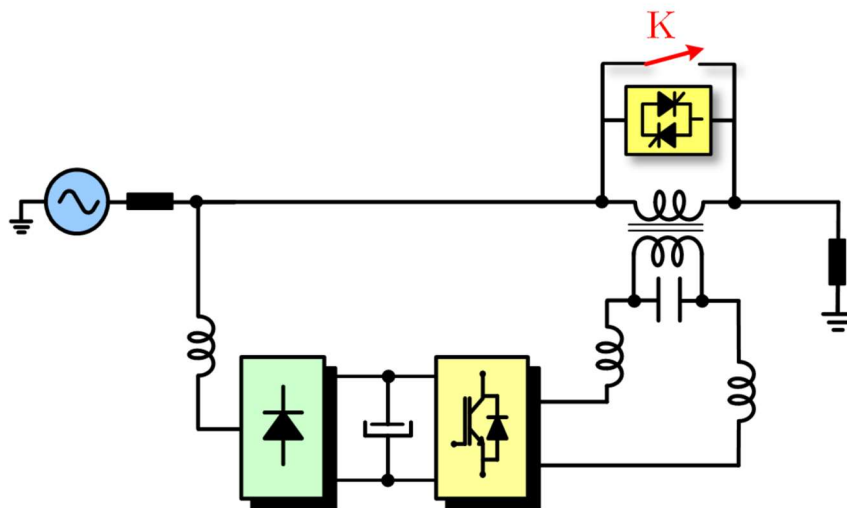
Devido às características de conexão do compensador à rede, ele só pode eliminar os problemas que degradam a qualidade da energia elétrica ligados à tensão (ANDREWS et al., 2014). Devido a isso, essa configuração garante a possibilidade de operação do dispositivo como filtro ativo série, sintetizando em sua saída uma tensão capaz de eliminar os harmônicos de tensão na rede elétrica (ANTUNES, 2018).

O compensador série é protegido, em condições de falta, por uma chave estática de modo que, quando ocorre um curto circuito na carga durante a operação do conversor, sua tensão é levada

a zero e os tiristores são ligados, fornecendo um caminho alternativo para a circulação da corrente até o momento de atuação do disjuntor, isolando a falta e, por consequência, protegendo o conversor. Por outro lado, quando o compensador não está atuando enquanto a rede opera em condições normais, a chave estática fornece um caminho para a corrente da rede, tendo uma conexão em paralelo entre um contator e a chave estática, garantindo a possibilidade de dimensionamento dos tiristores a partir da corrente de curto-circuito a jusante do seu ponto de instalação (SILVA et al., 2005; AMARAL et al., 2015).

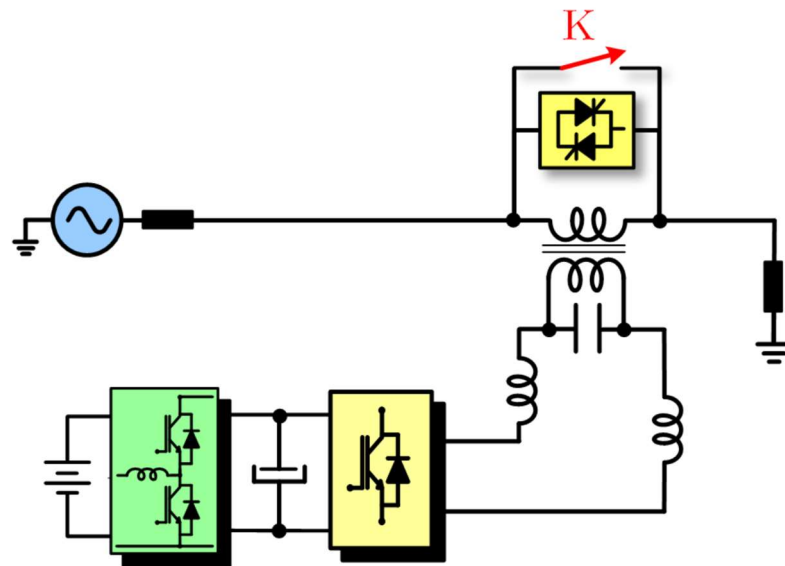
Um dos aspectos essenciais para o funcionamento do compensador série é a definição da fonte de energia que irá suprir o barramento em corrente contínua (CC) do seu inversor. Para garantir a adequação do compensador à condição proposta anteriormente, duas configurações são possíveis. A primeira delas é formada por um retificador a diodos suprindo o inversor, como pode ser observado na Figura 7. Por outro lado, a segunda configuração consiste em uma estrutura onde a energia pode ser extraída de alguma fonte externa ou por um conjunto armazenador de energia, como por exemplo, um banco de baterias (ANTUNES, 2018). Tal configuração pode ser analisada por meio da Figura 8.

Figura 7 – Configuração para suprimento do barramento CC do compensador série por retificador a diodo



Fonte: Antunes (2018).

Figura 8 – Configuração para suprimento do barramento CC do compensador série por banco de baterias e conversor *buck-boost*



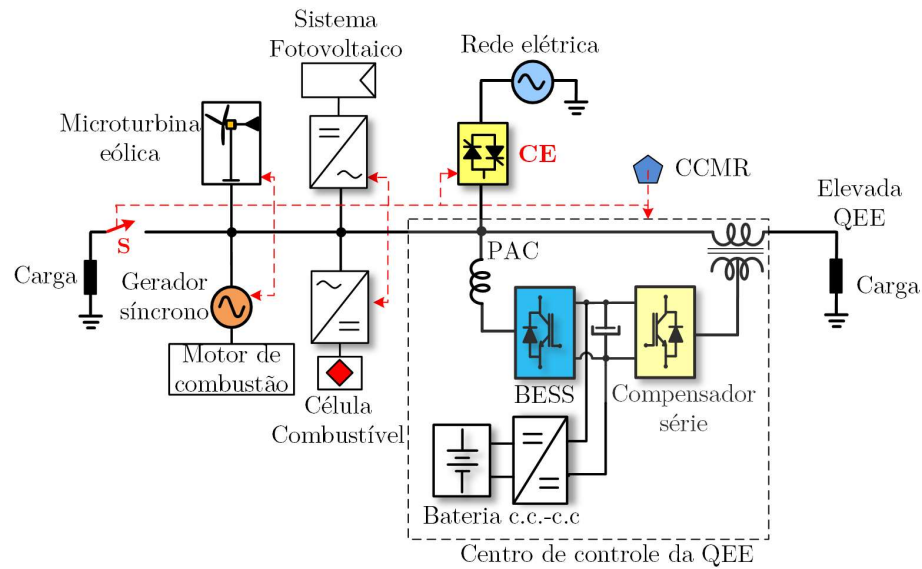
Fonte: Antunes (2018).

2.4 O Compensador Série nas Microrredes

No contexto das microrredes, a principal utilização dos compensadores série são referentes à compensação de afundamentos e elevações momentâneos de tensão (GAYATRI, PARIMI, KUMAR, 2015; LI et al., 2012). Mas tal dispositivo também apresenta a funcionalidade de filtro ativo série e regulador de tensão (CARASTRO; SUMNER; ZANCHETTA, 2006; SHAHNIA et al., 2011; DEHNAVI, SHAYANI, 2015). E, por fim, uma outra função do compensador série é prover isolamento da microrrede quando ocorre uma falta em sua jusante ou montante (SYED; KHADKIKAR, 2014).

Um conversor denominado de centro de controle da qualidade da energia elétrica (QEE), aplicado em uma microrrede, foi apresentado por Chung e outros (2008) e é ilustrado na Figura 9. Nessa configuração, *back-to-back*, o compensador encontra-se em série com a rede e sua função se restringe a regular a tensão na carga e prover mitigação das VTCDs.

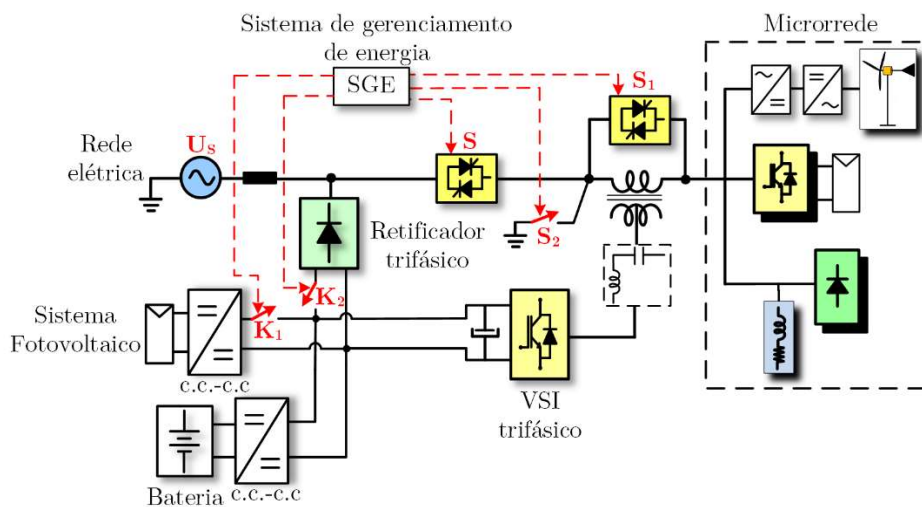
Figura 9 – Microrrede com centro de controle QEE



Fonte: Antunes (2018).

Por outro lado, Han e outros (2013) apresenta uma configuração de compensador série com diversas funções, como pode ser analisada na Figura 10. Tal configuração permite que o conversor atue como compensador série, no modo UPS ou microfona. Além disso, alterando os comandos das chaves estáticas S , S_1 e S_2 é possível controlar a operação do compensador como em modo conectado à rede ou de modo ilhado (ANTUNES, 2018). É válido salientar também que, todo o controle dos chaveamentos é coordenado por um sistema de gerenciamento de energia, garantindo a multifuncionalidade do compensador série.

Figura 10 – O compensador série com múltiplas funções



Fonte: Antunes (2018).

2.5 Comentários sobre Microrredes

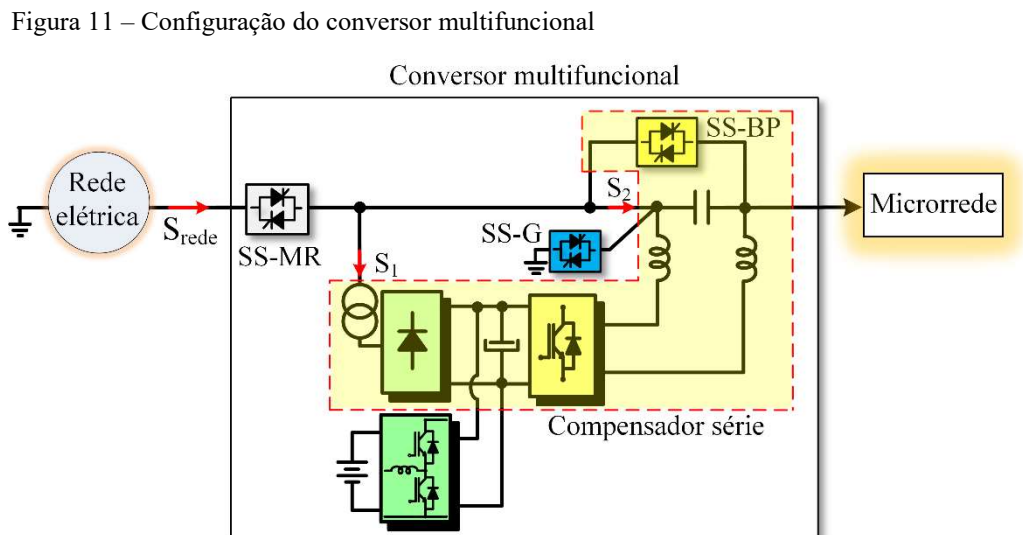
Nesta seção, foram apresentados os principais componentes de uma microrrede junto às suas funcionalidades no contexto exposto, sendo eles o CCMR, o CL, a CE e as microfones. Em seguida, foram demonstrados e exemplificados os modos de operação de uma microrrede e as configurações necessárias para torna-los possíveis. Além disso, foram expostas as possibilidades de funcionamento dos conversores eletrônicos nas microrredes e suas atribuições, sendo elas a de supridor de rede, formador de rede e a de suporte à rede. Por fim, foram denotadas as funções de um compensador série de tensão e sua composição, tanto em funcionamento quanto para sua proteção, sendo finalizada a seção com a introdução dele à microrrede e os meios necessários para que isso ocorra.

3 O CONVERSOR MULTIFUNCIONAL

Nesta seção será proposto um conversor multifuncional monofásico fundamentado no compensador série, e aplicado em uma microrrede CA com controle centralizado. Além disso, será demonstrada a topologia do conversor multifuncional, seus principais modos de operação e os componentes necessários para o projeto e controle do conversor.

3.1 Topologia do Conversor Multifuncional

O conversor multifuncional é apresentado na Figura 11.



Fonte: Antunes (2018).

A partir da Figura 11, pode-se verificar que o conversor multifuncional pode operar em série, ou em paralelo com a rede elétrica. Além disso, é válido salientar a presença das duas chaves eletromecânicas (S_1 e S_2) e as três chaves estáticas (SS-BP, SS-MR e SS-G). É importante salientar que a chave SS-BP possui como finalidade a proteção contra a falta a jusante do conversor (FARHADI-KANGARLU; BABAEI; BLAABJERG, 2017). As chaves S_2 , SS-G e SS-BP são responsáveis pelo chaveamento e conseqüente conexão em série ou paralelo entre o compensador e a rede. Por fim, a rede S_1 permite a desconexão do transformador, reduzindo as perdas quando o lado CC do inversor é alimentado pelo banco de baterias (ANTUNES et al., 2017). Outro detalhe a ser notado é que todas as chaves estáticas são compostas por tiristores

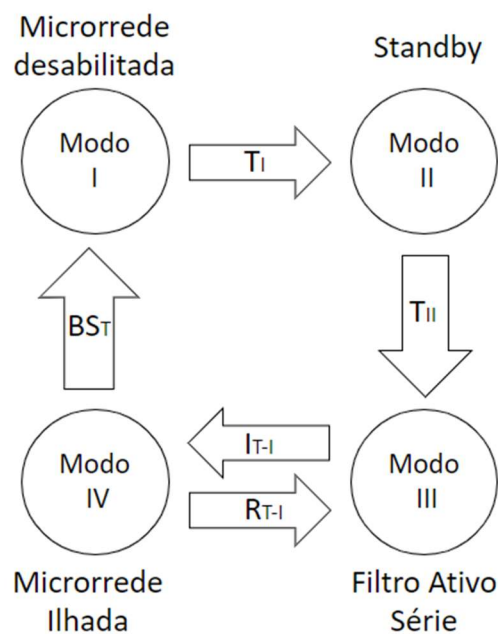
em antiparalelo, com contator em paralelo para operação em regime permanente. As configurações aqui propostas permitem que o conversor multifuncional atue de dois diferentes modos, sendo eles: formador de rede e suporte à rede.

Quando o conversor assume a função de suporte à rede, ele opera como um filtro ativo série, cuja função é de regulação da tensão, atuando consistentemente sobre as conseqüentes elevações ou afundamentos de tensão, tanto quanto compensação de harmônicos na rede. Por outro lado, quando o conversor atua como formador de rede, ele precisa gerar uma referência de tensão e frequência para o sistema tanto quanto para as cargas elétricas na microrrede no modo ilhado, além de garantir uma transição suave entre o modo conectado e ilhado e vice-versa, também é válido salientar que este deve ter a capacidade de realizar o *black-start*.

3.2 Principais Modos de Operação e Transição do Conversor Multifuncional.

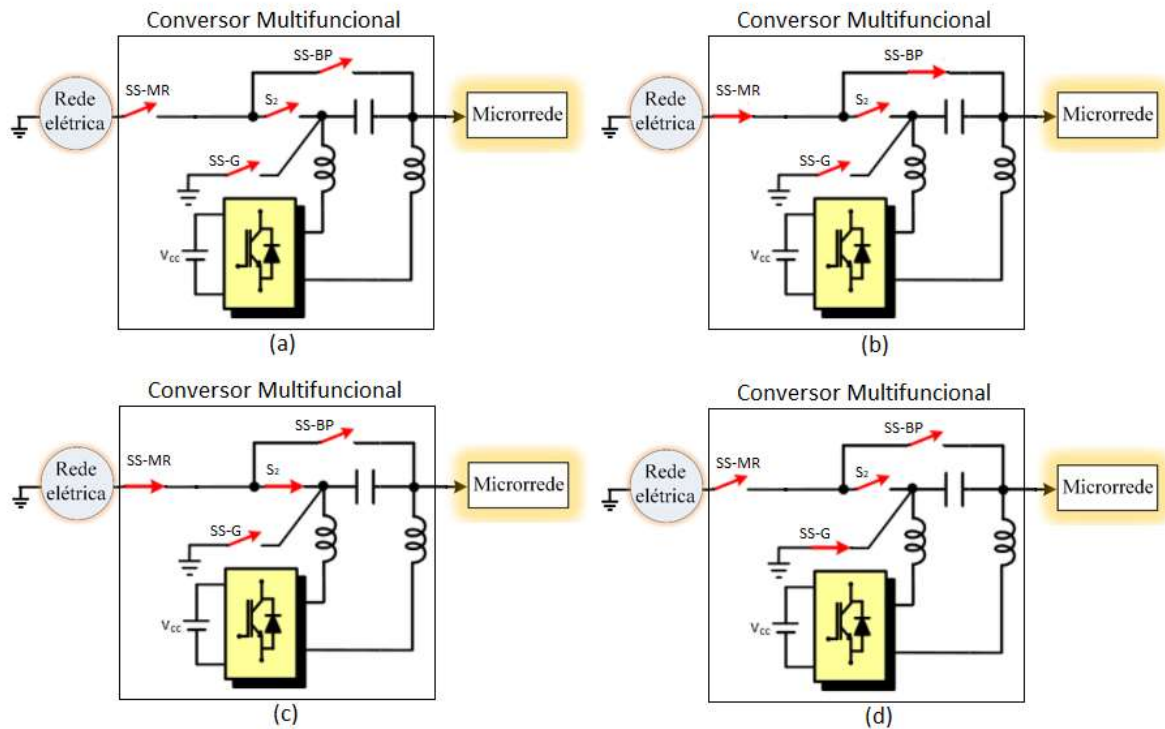
A Figura 12 ilustra os modos de operação do conversor multifuncional avaliados neste projeto, enquanto que a Figura 13 apresenta a configuração do conversor multifuncional e a posição das chaves estáticas para o conseguinte modo de operação requerido.

Figura 12 – Transições entre os modos de operação do conversor multifuncional



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 13 - Modos de operação do conversor multifuncional: (a) modo I; (b) modo II; (c) modo III; (d) modo IV



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Os principais modos de operação do conversor multifuncional são definidos a seguir:

- Modo I: A microrrede encontra-se desabilitada.
- Modo II: O conversor multifuncional está desabilitado, sendo o PAC da microrrede alimentado pela rede elétrica. Nesse modo, a chave SS-BP conecta a microrrede na rede elétrica, sendo o barramento CC alimentado por um retificador, carregando, dessa maneira, o banco de baterias, que não pode ser descarregado.
- Modo III: O conversor está conectado em série com a rede, tendo sua operação como de suporte à rede. Neste tipo de configuração, o conversor é responsável por compensar os distúrbios na forma de onda de tensão.
- Modo IV: Nesse modo o conversor pode possuir a função de *black-start*, uma vez que opera no modo ilhado como formador de rede.

Já os modos de transição são listados abaixo:

- T_I : Nessa transição a microrrede está ligada e o conversor multifuncional está operando em regime de *standby* para serviços terceiros, como, por exemplo, manutenção.
- T_{II} : Esta transição conecta o conversor multifuncional como um compensador série.
- I_{T-I} : Durante essa transição, o conversor está inicialmente conectado em série, e faz a transição da microrrede para o modo ilhado, ficando assim conectado em paralelo. Tal período de transição é realizado quando a corrente da microrrede passa por zero, o que garante a abertura da chave SS-MR e o fechamento de SS-G sem que haja um curto-circuito.
- R_{T-I} : Essa transição é responsável por reconectar a microrrede à rede elétrica. O início do processo é dado com a sincronização das tensões da microrrede com a rede principal. Na reconexão R_{T-I} , as chaves SS-MR e S_2 são fechadas e SS-G é aberta no instante em que a corrente na microrrede passa por zero, conectando o conversor em série com a rede. Por fim, uma vez terminada a R_{T-I} , o conversor possui duas possibilidades, migrar para o modo II ou se manter no modo III.
- B_{ST} : Nesta transição, o conversor multifuncional opera como formador de rede, realizando o *black-start*. A operação ocorre, inicialmente, no modo I, e então, o conversor multifuncional é ligado e passa a energizar o PAC no modo IV. Ainda há a possibilidade, caso seja necessário, de reconectar a microrrede na rede principal, sendo que, para isso, o conversor muda sua operação para o modo III usando a transição de conexão R_{T-I} .

3.3 Projeto e Controle do Conversor Multifuncional

Nesta subseção serão descritos os requisitos necessários para a projeção do filtro LC de saída e o controle do conversor multifuncional.

3.3.1 Projeto do Filtro LC

O filtro LC é responsável por garantir o acoplamento entre o conversor e a rede elétrica, além de reduzir o *ripple* do chaveamento PWM (do inglês, *pulse width modulation*). Como neste estudo o inversor irá atuar como fonte de tensão, tanto a corrente quanto a tensão no indutor são controladas (ROGABERT et al., 2012). Devido a isso, a corrente no ramo capacitivo do

inversor é limitada, usualmente, entre 10% e 15% da capacidade nominal do VSI (SILVA; CARDOSO FILHO, 2002).

O filtro LC utilizado neste projeto é de segunda ordem, com uma atenuação de 40dB/década, permitindo uma separação de uma década entre a frequência de corte e a frequência chaveamento, garantindo uma saída livre do *ripple* de chaveamento (SILVA, 1999).

Para o projeto do filtro LC do conversor multifuncional, adota-se a capacitância do filtro como sendo 10% da potência nominal do conversor monofásico, como pode ser observado na equação (1). Para o cálculo da indutância, adota-se uma frequência de corte (F_c) do filtro LC utilizando uma separação de uma década da frequência de chaveamento, como definido na equação (2).

$$C = \frac{KS_n}{2\pi f V_f^2} \quad (1)$$

$$F_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Onde:

S_n – Potência do VSI monofásica (kVA);

V_f – Tensão de fase (V);

k – Percentual de reativos do filtro LC;

V_{cc} – Tensão no barramento CC do inversor (V).

3.3.2 O Controle Repetitivo

O controle repetitivo tem por função a eliminação de distúrbios de carga e do seguimento, referências periódicas em sistemas de controle. De acordo com Francis e Wonham (1975), para que um sistema de controle possua erro nulo, independentemente do tipo de entrada, é necessária a inclusão do modelo deste sinal em um sistema de malha fechada estável, garantindo um rastreamento minucioso da entrada e uma boa capacidade de rejeição ao distúrbio presente (CUIYAN; DONGCHUN; XIANYI, 2004). Uma ação de controle é produzida com uma realimentação negativa utilizando um atraso igual à metade do período da componente fundamental do sinal de entrada ($T/2$).

A função de transferência do CR é apresentada na equação (3):

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{1}{1 + e^{-s\frac{T}{2}}} \quad (3)$$

Os polos da função apresentada na equação (3) são encontrados igualando seu denominador a zero, como pode ser observado pelos cálculos abaixo até se alcançar o resultado apresentado pela equação (4)

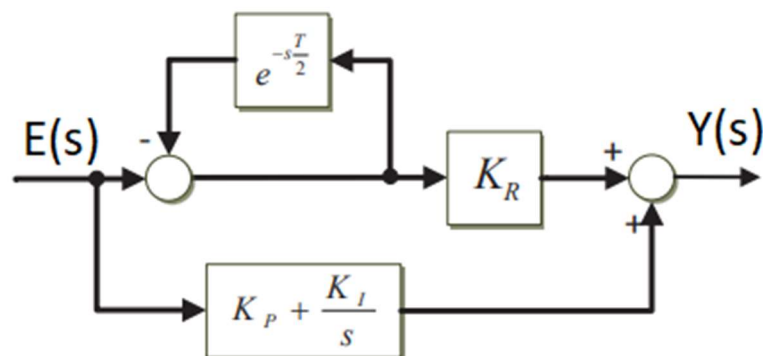
$$e^{-s\frac{T}{2}} = -1$$

$$e^{-s\frac{T}{2}} = e^{\pm j2\pi(m+\frac{1}{2})}, \text{ onde } m = 0, 1, \dots, \infty$$

$$s = \pm j\omega(2m + 1) \quad (4)$$

Na Figura 13 é apresentado um diagrama do CR associado em paralelo ao PI e em cascata com o controlador proporcional, atendendo ao princípio do modelo interno. Uma ação de controle pode ser produzida com uma realimentação negativa e com um atraso equivalente à meio período da componente fundamental do sinal de entrada.

Figura 14 – Controlador CR em paralelo com controlador PI

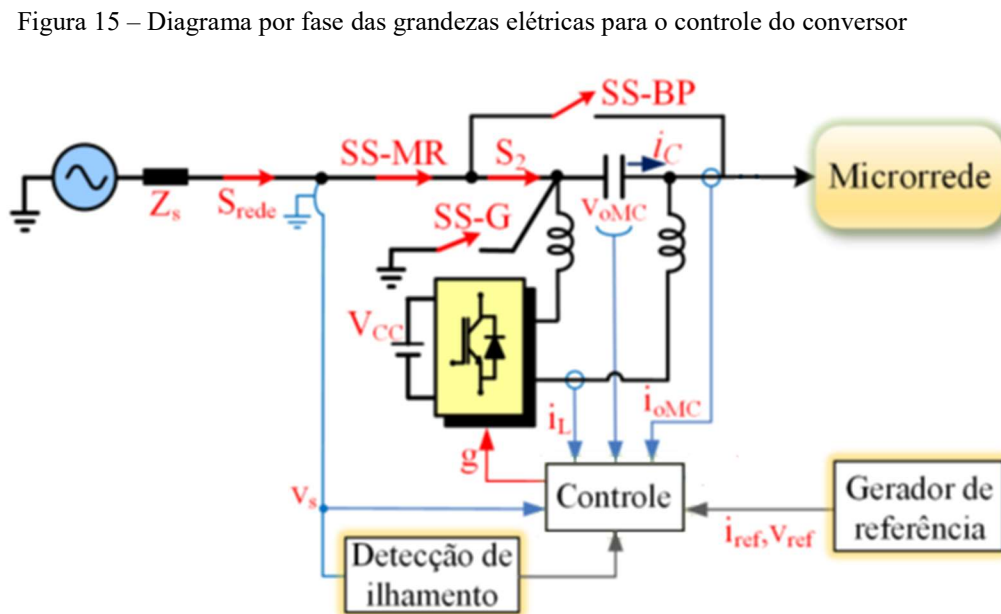


Fonte: Produzido pelo próprio autor.

É válido notar que os polos do CR se encontram localizados no eixo imaginário e são múltiplos ímpares da fundamental, não tornando possível a ocorrência de um polo na origem.

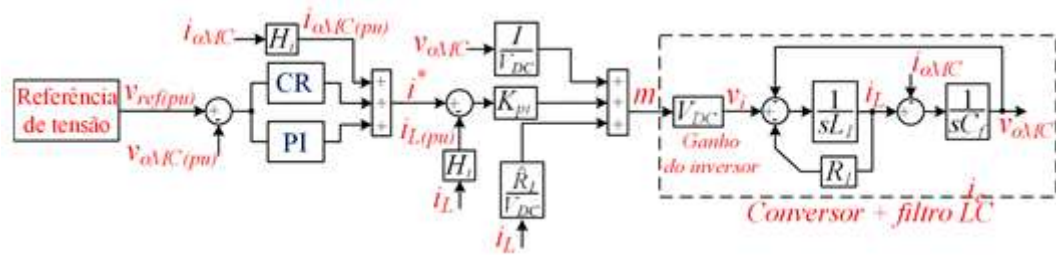
3.3.3 Controle de Tensão do Conversor Multifuncional

A Figura 14 mostra um diagrama por fase com todas as grandezas elétricas medidas para o controle do conversor. Enquanto a Figura 15 exibe o diagrama de controle para operação como uma fonte de tensão controlada. É importante salientar que o controle do conversor multifuncional tem como principal função garantir o funcionamento da microrrede, promovendo uma transição suave e eficaz entre seus modos de operação. Desse modo, pode-se observar não apenas o gerador de referência do conversor, mas também um bloco para a detecção do ilhamento do sistema, sendo que este bloco é fundamentado em uma técnica do tipo passiva, monitorando a tensão eficaz na rede e sua frequência elétrica.



Fonte: Antunes (2018).
Nota: Adaptado pelo autor.

Figura 16 – Estrutura de controle implementada em coordenadas naturais



Fonte: Antunes (2018).

Nota: Adaptado pelo autor.

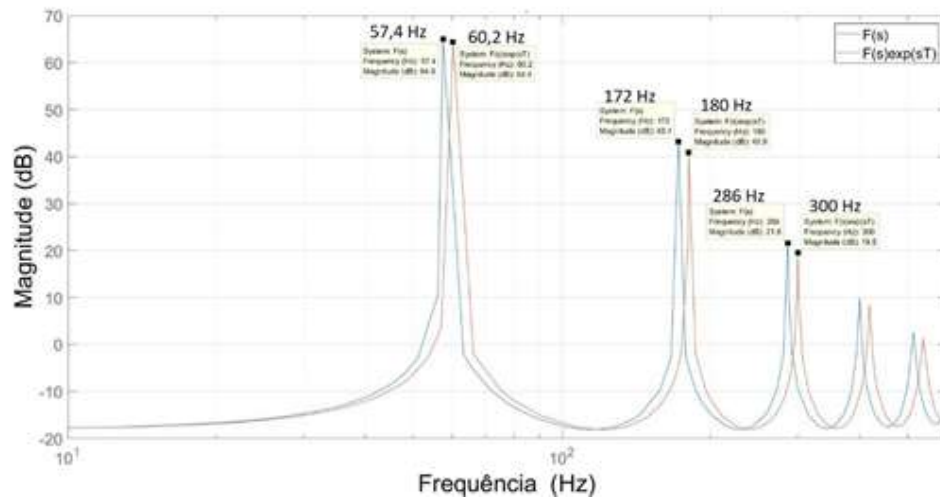
O controle do conversor multifuncional tem como objetivo proporcionar uma transição suave entre os modos de operação da microrrede, bem como garantir a sua operação. Para isso, ele é composto pela associação paralela do CR para harmônicas ímpares e o controlador proporcional-integral (PI) para a malha de tensão e em cascata com um controlador proporcional (P) para a malha de corrente (ANTUNES, 2018).

O CR necessita de, pelo menos, meio ciclo, para o início de sua atuação, para tanto, é utilizado o controlador PI de modo a melhorar a resposta transitória do sistema. Além disso ações de *feedforward* e cancelamento da resistência equivalente da indutância do filtro LC, sendo que a primeira inclui a realimentação da tensão e corrente de saída (SILVA, 2012).

Para determinar os ganhos dos controladores P e PI, o CR é inicialmente desativado e a frequência de chaveamento é definida como sendo 12 kHz. Por meio das funções de transferência de malha aberta do circuito apresentado na Figura 15 é possível determinar os ganhos dos controladores, sendo importante salientar que a frequência de crossover é determinada de acordo com a malha de análise. A partir disso, determina-se a frequência de crossover da malha de tensão como sendo 660 Hz e a margem de fase como sendo 60°. Para a malha de corrente, determina-se a frequência de crossover da malha de tensão como sendo 1,2 kHz e a margem de fase como sendo 60° (YAZDANI; IRAVANI, 2010). Desse modo, os ganhos projetados são $K_{pi} = 0,4497 \Omega$, $K_{pv} = 1,024 \Omega^{-1}$ e $K_{iv} = 89,508 \Omega^{-1}s^{-1}$, adotando um sensor de corrente (H_i) igual a $\frac{1}{280} (VA^{-1})$ e um sensor de tensão (H_v) igual a $\frac{1}{150} (VV^{-1})$. Além disso, a garantia de estabilidade do CR é promovida por meio de um filtro passa-baixa (FPB) com frequência de corte equivalente à 600 Hz, adequando, dessa maneira, a faixa de passagem que o conversor pode operar (CHEN et al., 2008).

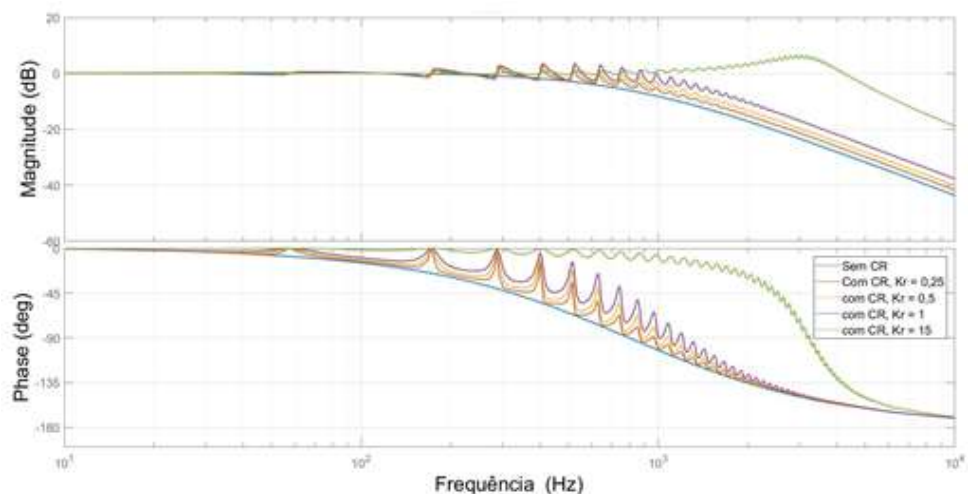
No momento em que o FPB e o PI são acrescentados à malha de tensão, os polos do CR são deslocados devido à inexistência da característica de fase nula em sua resposta de frequência (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2001). Para determinar a necessidade de correção nos polos do CR, esboça-se a função de transferência da tensão em malha aberta na Figura 16. A partir de uma implementação digital do CR com $T_s = 12$ kHz, ocorre um avanço de fase equivalente a quatro amostras, forçando o atraso do CR para $z^{-(100+4)}$. Por fim, a partir da função de transferência do sistema, exibida na Figura 17, é possível observar que um ganho K_{RV} igual a 0,5 permite melhorar a faixa de passagem da malha de tensão além de garantir uma faixa de passagem menor que a malha de corrente (ANTUNES, 2018).

Figura 17 – Diagrama de Bode com filtro $F(s)$ e com filtro $F(s) +$ avanço



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 18 – Diagrama de Bode da função de transferência de malha fechada



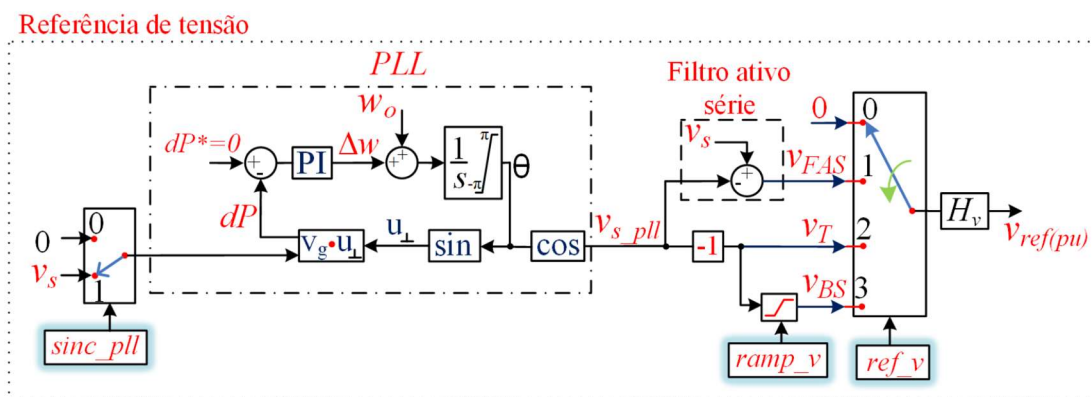
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

3.3.4 Referência de Tensão

É necessário que haja um sincronismo entre o conversor multifuncional e a rede de alimentação. Para isso, utiliza-se um PLL. Este dispositivo é capaz de detectar a perda da rede de alimentação principal, chaveando a microrrede para o modo ilhado. Isso permite que, quando a microrrede encontra-se neste modo de operação, a função *feedforward* do PLL irá produzir uma tensão de referência senoidal para o circuito operar enquanto a rede de alimentação não está reestabilizada. Uma outra função do PLL é garantir o sincronismo da tensão e frequência da rede de alimentação com o conversor multifuncional. Ao mesmo tempo, ele irá verificar se a rede de alimentação já possui os valores nominais para as grandezas supracitadas, permitindo a reconexão do conversor multifuncional à rede principal. Além disso, quando a microrrede está operando no modo conectado, ele compara os sinais de tensão da rede com o sinal de referência do conversor multifuncional, permitindo a compensação de fatores de degradação da rede como afundamentos e elevações momentâneos de tensão.

O bloco de referência de tensão é esboçado na Figura 18.

Figura 19 – Bloco de referência de tensão utilizado no conversor multifuncional



Fonte: Antunes (2018).

Da Figura 18, pode-se perceber que a $V_{ref(pu)}$ depende dos valores combinados de *sinc_pll*, *ramp_v* e *ref_v*. Portanto, pode-se perceber que a seleção da aplicabilidade do inversor é definida de acordo com a seleção da chave descrita por *ref_v*, que será apresentada a seguir.

- *ref_v* na posição 0: Neste caso, o conversor está atuando em *standby*, o que faz com que nenhuma tensão de referência ($V_{ref(pu)}$) seja gerada. O valor de *sinc_pll* é 1 enquanto o inversor estiver nesta etapa. Seu modo de operação é o II, de acordo com a Figura 12.

- *ref_v* na posição 1: Neste caso, o conversor está atuando com a função de filtro ativo série, ou seja, sua função junto ao sistema é de suporte à rede. O valor de *sinc_pll* continua sendo 1 enquanto o inversor estiver nesta etapa. Seu modo de operação é o III, de acordo com a Figura 12.
- *ref_v* na posição 2. Neste caso, o conversor realizou a transição do modo conectado à rede para o modo ilhado. O valor de *sinc_pll* é chaveado para 0 assim que o inversor é colocado nesta etapa. Seu modo de operação é o IV, de acordo com a Figura 12.
- *ref_v* na posição 3. Neste caso, o conversor ainda se encontra no modo ilhado, entretanto, neste caso a tensão de referência gerada é feita a partir do procedimento de *black-start*. O valor de *sinc_pll* continua sendo 0 enquanto o inversor estiver nesta etapa.
- Por fim, ocorre a reconexão do modo ilhado para o conectado à rede com o conversor multifuncional ligado em série ao circuito. Desse modo a variável *ref_v* é inicializada com o valor 1. O valor de *sinc_pll* retorna a 1 enquanto o inversor estiver nesta etapa.

Outro ponto a se destacar na geração da tensão de referência é quanto à detecção de ilhamento do sistema, que é feita por meio de uma técnica passiva, alocada no CCMR, que envia um sinal de controle para forçar o inversor do elemento armazenador de energia a operar no modo V-f em uma arquitetura de controle centralizado, permitindo o ilhamento da microrrede. (REIGOSA et al., 2012; BELTRAN et al., 2006). Neste trabalho, o CCMR é implementado no conversor multifuncional.

3.4 Comentários sobre o Conversor Multifuncional

A partir dessa seção, torna-se evidente a importância das CEs e do CR na arquitetura do conversor multifuncional proposto. Junto a isso, foram analisados os modos de operação e suas transições que a microrrede pode assumir durante seu funcionamento. Além disso, foi possível analisar o projeto do filtro LC para a composição do sistema proposto junto com todas as variáveis, direta e indiretamente interligadas, como frequência de corte, indutância e capacitância, *ripple*, entre outros. Outro ponto importante a ser analisado são os meios de controle de tensão cabíveis e necessários para o melhor funcionamento do sistema, meios estes obtidos por meio da malha de controle aberta do sistema, permitindo a obtenção dos ganhos

essenciais ao funcionamento do bloco de controle do projeto proposto. Por fim, foram apresentadas as referências de tensão para os modos de operação do conversor multifuncional.

4 ESTUDO DE CASO

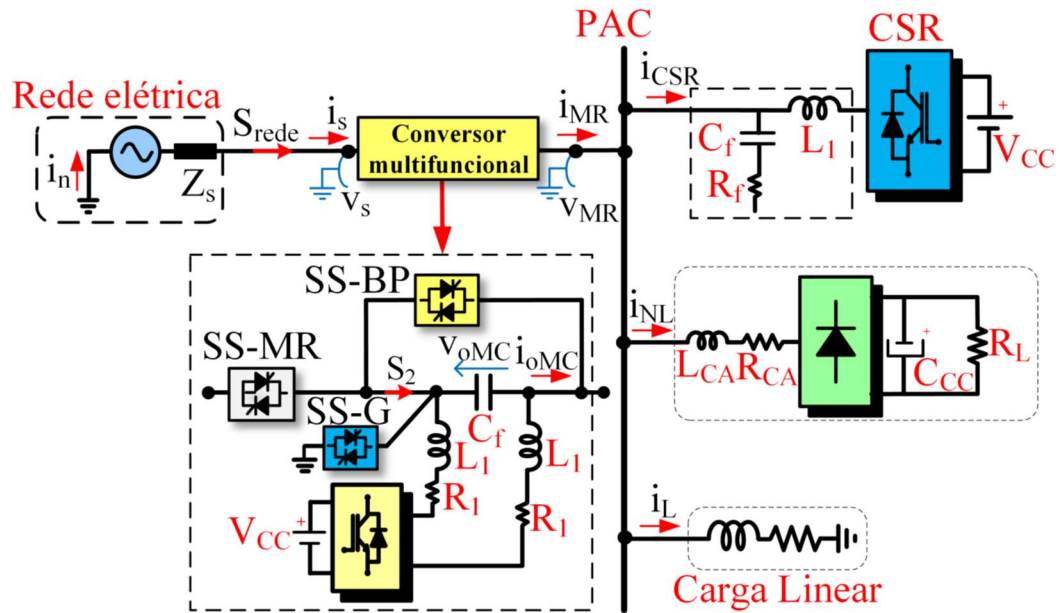
Nesta seção, primeiramente será mostrada a configuração e topologia da microrrede em estudo, bem como as variáveis significativas para a obtenção dos objetivos proposto por este projeto. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos por meio das simulações nos diferentes modos e condições propostos para o conversor multifuncional série com controle centralizado em uma microrrede CA. Os cenários apresentados proporcionam a operação do conversor tanto como supridor de rede quanto de formador de rede, permitindo, desse modo, a sua atuação para tratar de situações como: compensar elevação ou afundamento de tensão e tratar harmônicos, sendo esses casos com ou sem a presença de carga acoplada ao sistema, permitindo, dessa maneira, a regulação de tensão do sistema. Outros modos de atuação seriam as transições entre o modo conectado e o ilhado da microrrede, seja de maneira intencional ou não, bem como, um *black-start* e, por fim, o retorno do modo ilhado para o modo conectado à rede.

4.1 A Microrrede em Estudo

O sistema elétrico utilizado nesse estudo é composto por uma rede elétrica, um conversor multifuncional, um conversor supridor de rede (CSR), uma carga linear e não linear. Para se obter os resultados esperados, uma série de grandezas elétricas são analisadas a fim de se obter o comportamento do circuito elétrico como um todo, permitindo ao controle do conversor multifuncional adaptar o seu funcionamento de acordo com a operação da microrrede.

A configuração da microrrede monofásica e o conversor multifuncional proposto são ilustrados na Figura 19 e a ideia de sua configuração multifuncional é descrita por Han e outros (2013) enquanto que a configuração do conversor é definida a partir do dispositivo dinâmico de proteção série, mas com um inversor em ponte H (SILVA; CARDOSO FILHO, 2002). A microrrede é do tipo ilha secundária, com uma fonte de geração distribuída, consumidores e rede de distribuição de baixa tensão. É importante a observação de que, para habilitar o fluxo bidirecional no conversor multifuncional, um conversor buck-boost e um banco de baterias são adicionados ao seu barramento CC (SILVA; LUIZ; MATOS, 2014).

Figura 20 – Configuração da microrrede monofásica



Fonte: Antunes (2018).

Na composição do compensador série, há uma chave eletromecânica (S_2) e três chaves estáticas (SS-BP, SS-G e SS-MR). Um adendo importante é quanto a funcionalidade da chave SS-BP, que é responsável pela proteção do conversor para a condição de falta a jusante (FARHADI-KANGARLU; BABAEI; BLAABJERG, 2017). As chaves S_2 , SS-G e SS-BP, garantem ao conversor a possibilidade de conexão em série ou paralelo com a rede elétrica. Por fim, a chave SS-MR é responsável por possibilitar a transição do modo conectado para o modo ilhado e vice-versa. Um adendo importante é que a chave S_{rede} , não é integrante do conversor multifuncional, sendo controlada pela rede elétrica principal do sistema.

A carga da microrrede é composta por uma carga do tipo linear e não linear. A primeira é composta por uma impedância constante. A segunda é formada por um retificador à diodos monofásico em ponte completa, com capacitor e resistor no lado CC (ANTUNES et al., 2017). Os dados bases das grandezas utilizadas nesse projeto podem ser analisadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros elétricos da microrrede

Sistema	Parâmetros
Rede elétrica	1 ϕ , 127 V (1 pu), 60 Hz, $S_{cc} = 1$ MVA, $X/R = 0,5$
Conversor multifuncional	1 ϕ VSI, 25 kVA, $f_{sw} = 12$ kHz, $L_1 = 29$ μ H, $R_1 = 11$ m Ω , $C_f = 308$ μ F, $V_{cc} = 311$ V
Carga linear	13 kVA, $f_p = 0,8$ atrasado
Carga não linear	127 V, 10 kW, $C_{cc} = 30$ mF, $R_L = 3\Omega$, $R_{CA} = 64$ m Ω , $L_{CA} = 30$ μ H

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

4.2 Cálculo dos Componentes do Filtro LC

Baseando-se nas equações 3.1, 3.2 e 3.3 e com os seguintes valores propostos:

- $S_n = 25$ kVA;
- $V_f = 127$ V;
- $f = 60$ Hz;
- $k = 0,1$;
- $f_{sw} = 12$ kHz;
- $V_{cc} = 311$ V;

Calcula-se o valor do capacitor do filtro LC como sendo 411,15 μ F e o indutor como sendo 42,784 μ H.

4.3 Cenário I – Filtro Ativo Série e Modo Conectado

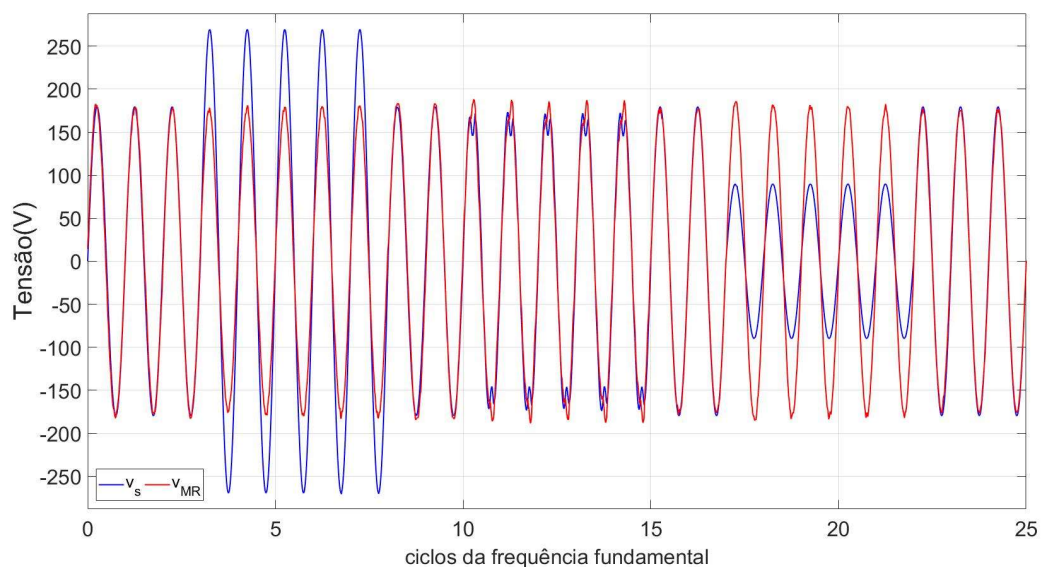
Neste cenário, o sistema encontra-se no modo III da Figura 12, ou seja, o conversor multifuncional está ligado em série com a microrrede e atua como suporte à rede, operando com o intuito de regular a tensão do sistema, por meio da compensação tanto da elevação quanto do afundamento da tensão, além de compensar os harmônicos existentes na rede. Também nessa funcionalidade, o inversor permite que cargas sejam acrescentadas ao sistema sem apresentar queda de tensão no PAC da microrrede.

4.3.1 Conversor como Filtro Ativo Série Sem Carga

Neste cenário, o inversor regula a tensão da microrrede nos instantes em que ocorrem elevação, afundamento e harmônicos de tensão na forma de onda da rede elétrica principal. Para a criação de tal situação, foram seguidos os procedimentos descritos a seguir e o seu resultado, apresentado em função da quantidade de ciclos da fundamental, pode ser observado na Figura 20. Vale salientar que a variável de tempo segundos (s) equivale a 60 ciclos da frequência fundamental.

- $t = 0 \text{ s}$ → O conversor multifuncional conecta a microrrede à rede elétrica do sistema;
- $t = (3/60) \text{ s}$ → Ocorre uma elevação de 0,5 pu na rede elétrica;
- $t = (8/60) \text{ s}$ → A tensão retorna a 1 pu sem distorção na rede elétrica;
- $t = (10/60) \text{ s}$ → A tensão na rede passa a ficar distorcida com os harmônicos $V_{3h}=0,1 \text{ pu}$, $V_{5h}=0,05 \text{ pu}$, $V_{7h}=0,025 \text{ pu}$ e $V_{11h}=0,01 \text{ pu}$;
- $t = (15/60) \text{ s}$ → A tensão retorna a 1 pu sem distorção na rede elétrica;
- $t = (17/60) \text{ s}$ → Ocorre um afundamento de 0,5 pu na rede elétrica;
- $t = (22/60) \text{ s}$ → A tensão retorna a 1 pu sem distorção na rede elétrica;
- $t = (25/60) \text{ s}$ → Fim da simulação.

Figura 21 – Formas de onda da tensão na rede (V_s) e no PAC da microrrede (V_{MR}) sem carga

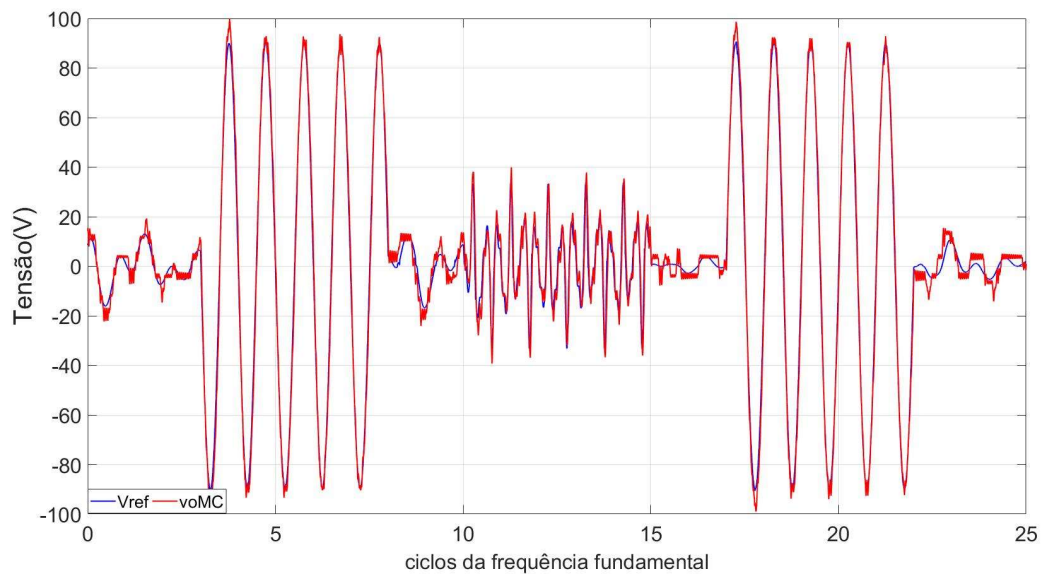


Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Da Figura 20 é possível observar que a tensão no PAC da microrrede fica senoidal, mesmo com a presença de harmônicos, elevações e afundamentos de tensão na rede elétrica. Um outro ponto interessante a se comentar é que a corrente que circula na microrrede ao longo desta simulação é nula, uma vez que não há carga conectada ao sistema.

Para que a tensão na microrrede seja mantida no formato senoidal, o conversor multifuncional gerou uma determinada tensão de referência ($V_{ref}(pu)$) diferente para cada fenômeno na forma de onda da rede, compensando o recorrente distúrbio que ocorria. Para isso, o *sinc_pll* do bloco de referência de tensão deve ser mantido em V_s , como exemplificado na Figura 17, o valor de *ramp_v* é irrelevante para este cenário, sendo desabilitado, e o valor de *ref_v* é chaveado para 1. O resultado obtido é esboçado na Figura 21.

Figura 22 – Formas de onda da tensão de referência (V_{ref}) gerada pelo compensador série e no capacitor do filtro LC (voMC)



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

4.3.2 Conversor como Filtro Ativo Série com Carga

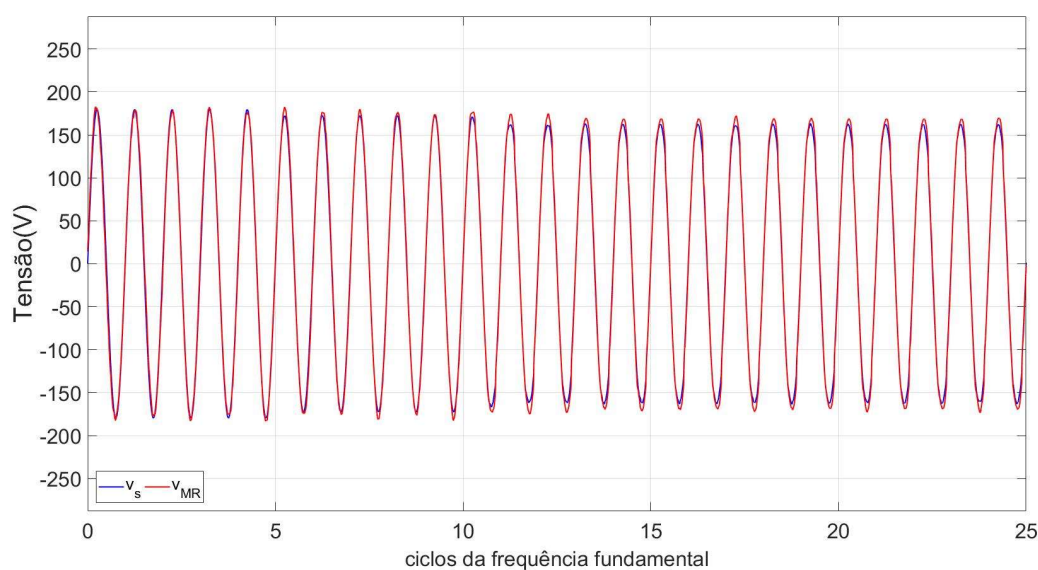
Neste tópico, a microrrede continua conectada à rede e o conversor mantém a mesma funcionalidade da simulação anterior, ou seja, como filtro ativo série. Entretanto, é analisado o

comportamento das formas de onda com a inserção de duas cargas à microrrede, uma linear e outra não linear. O procedimento proposto está detalhado a seguir:

- $t = 0 \text{ s} \rightarrow$ O conversor multifuncional conecta a microrrede à rede elétrica;
- $t = (5/60) \text{ s} \rightarrow$ Uma carga linear é conectada ao sistema;
- $t = (10/60) \text{ s} \rightarrow$ Uma carga não-linear é conectada ao sistema;
- $t = (25/60) \text{ s} \rightarrow$ Fim da simulação.

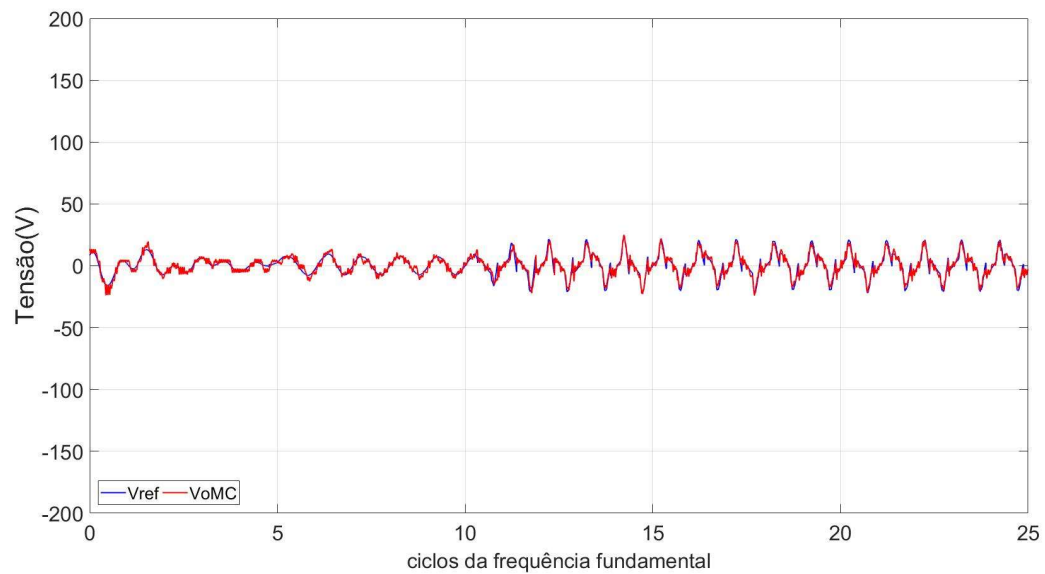
Pode-se perceber, da Figura 22, que, no instante referente à 5 ciclos da frequência fundamental, quando a carga linear é conectada ao sistema, a tensão da microrrede sofre uma pequena alteração causada pela queda de tensão devido à impedância constante inserida ao circuito. Entretanto, o formato senoidal é mantido sem muito esforço pelo compensador série. Entretanto, no instante em que a carga não linear é acoplada, a forma de onda da tensão sofre uma deformação, obrigando o compensador série a compensar a queda de tensão causada por esta carga. Para que este resultado fosse obtido, não foram necessárias alterações no bloco responsável por gerar a tensão de referência do compensador, que é esboçado na Figura 18, portanto, o valor do *sinc_pll* continua em V_s , *ramp_v* continua irrelevante neste cenário e *v_ref* continua chaveado em 1. O formato da onda de tensão inserida pelo compensador série ao sistema para manter a tensão da microrrede com formato senoidal e nos limites esperados (180 Volts) podem ser observados na Figura 23.

Figura 23 – Formas de onda da tensão na rede (V_s) e no PAC da microrrede (V_{MR}) com carga



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

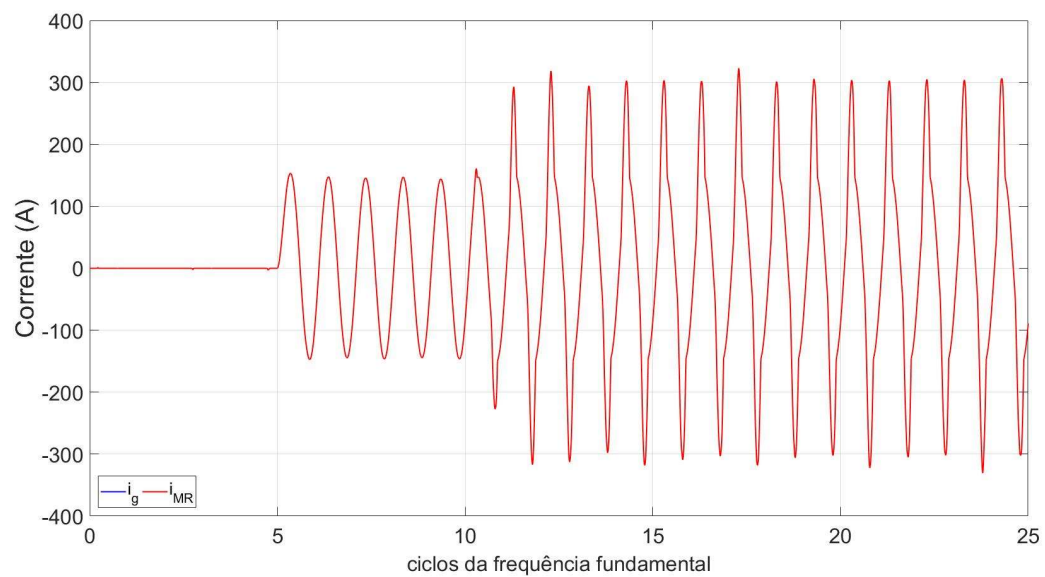
Figura 24 – Formas de onda da tensão de referência (V_{ref}) gerada pelo compensador série e no capacitor do filtro LC (V_{oMC})



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Outra grandeza interessante a se analisar nesse tópico é o comportamento da corrente no circuito em estudo, tendo em vista que, na primeira simulação a corrente é nula já que não há a presença de uma carga. Agora ela apresenta um formato de onda característico e esperado quando há a inserção tanto da carga linear quanto da não-linear, como pode ser observado na Figura 24.

Figura 25 – Formas de onda da corrente na rede (I_s) e microrrede (I_{MR}) com carga



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

4.4 Cenário II – Transição do Modo Conectado para o Modo Ilhado

Neste cenário, serão analisadas duas possibilidades, sendo elas, quando ocorre a transição do modo conectado à rede para o ilhado de maneira intencional e quando essa situação acontece de maneira não intencional. Neste caso, o conversor encontra-se no modo III da Figura 12 e, por meio da transição I_{T-I} , e atinge o modo IV da mesma figura. Em ambos os casos, o compensador inicialmente está atuando como filtro ativo série enquanto a microrrede está conectada à rede de alimentação principal, mas, no instante em que ocorre a transição para o modo ilhado, o conversor multifuncional deixa de ser um provedor de suporte à rede e passa a operar como formador de rede.

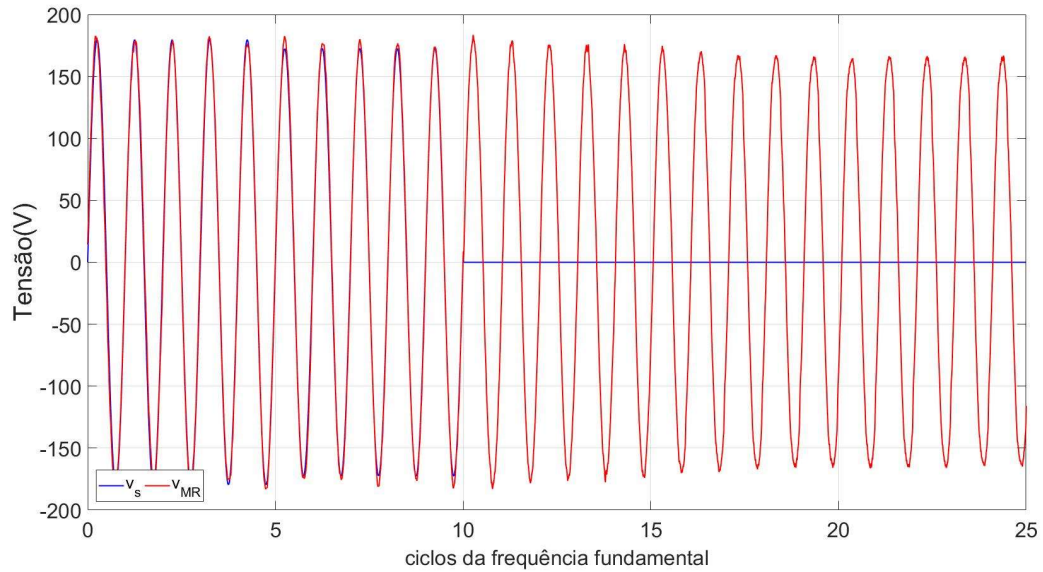
4.4.1 Transição do Modo Conectado à Rede para o Modo Ilhado de Maneira Intencional

Nesse tópico, o conversor multifuncional está, inicialmente, com a função de filtro ativo série, provendo suporte à rede com o intuito de regular a tensão e melhorar a QEE no PAC da microrrede, como descrito no modo III da Figura 12. Em determinado momento, é dado um comando para o ilhamento da microrrede de maneira intencional, fazendo com que o conversor multifuncional passe a atuar como formador de rede, como descrito no modo IV da Figura 12. O procedimento proposto está detalhado a seguir:

- $t = 0 \text{ s} \rightarrow$ O conversor multifuncional conecta a microrrede à rede elétrica;
- $t = (5/60) \text{ s} \rightarrow$ Uma carga linear é conectada ao sistema;
- $t = (10/60) \text{ s} \rightarrow$ O conversor multifuncional muda intencionalmente para o modo IV e a microrrede passa a operar no modo ilhado;
- $t = (15/60) \text{ s} \rightarrow$ Uma carga não-linear é conectada ao sistema;
- $t = (25/60) \text{ s} \rightarrow$ Fim da simulação.

A forma de onda das tensões na rede e na microrrede podem ser observadas na Figura 25.

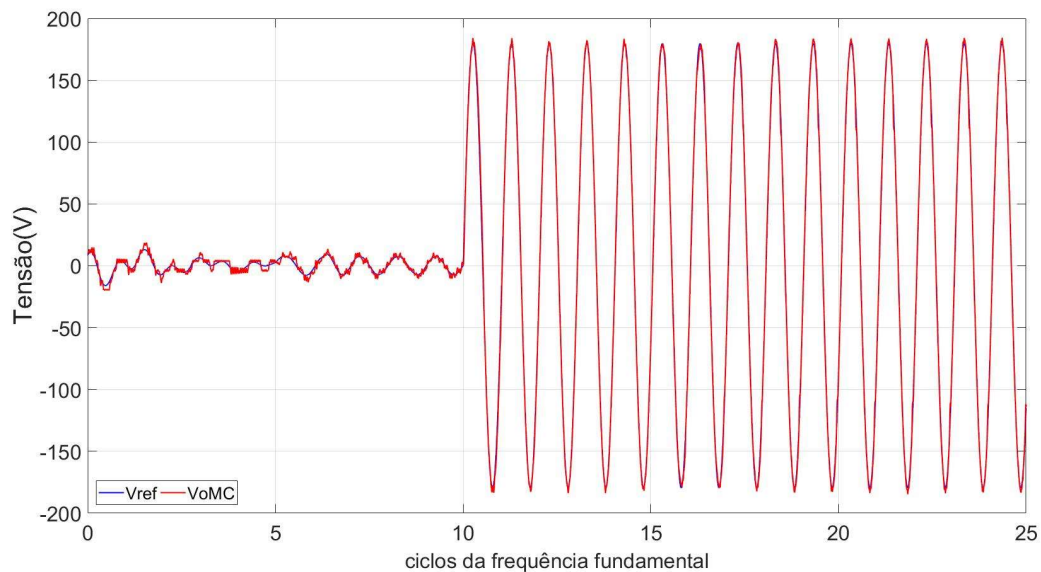
Figura 26 – Formas de onda da tensão na rede (V_s) e no PAC da microrrede (V_{MR}) com carga



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A transição do modo conectado à rede para o modo ilhado ocorreu no instante referente a 10 ciclos da frequência fundamental, conforme a Figura 25. Nela, pode-se observar que o conversor multifuncional estava inicialmente funcionando como um suporte à rede, compensando afundamentos e elevações momentâneos de tensão, tanto como harmônicos, que estavam presentes na rede elétrica e após o chaveamento para o modo ilhado, perde-se a referência de tensão da rede de alimentação, mas a forma de onda de tensão na microrrede permanece senoidal devido ao chaveamento do conversor multifuncional que assumiu a função de formador de rede na ausência da rede elétrica principal. A tensão de referência gerada pelo conversor multifuncional pode ser observada na Figura 26.

Figura 27 – Formas de onda da tensão de referência (V_{ref}) gerada pelo compensador série e no capacitor do filtro LC (V_{oMC})

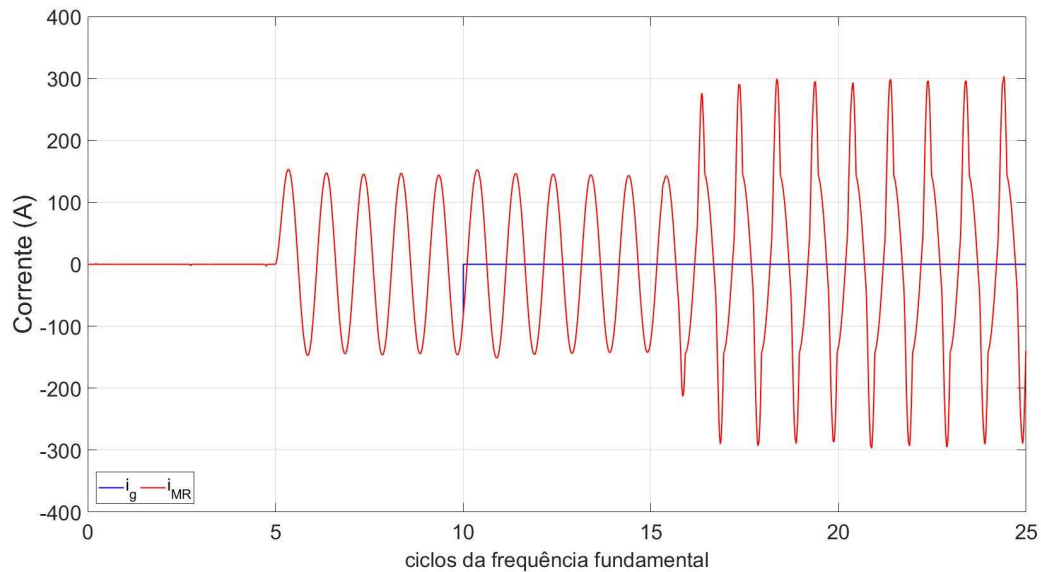


Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Para que o conversor multifuncional seja capaz de assumir a função de formador de rede, é necessária a alteração de algumas variáveis no bloco de referência de tensão do dispositivo, ilustrado na Figura 18. Primeiramente, a variável *sinc_pll* foi chaveado para 0, uma vez que para que a transição ocorra de maneira suave e correta, é necessário desconectar a PLL da medição da rede. Desse modo, a ação *feedforward* (w_0) da PLL irá produzir uma referência de tensão senoidal. Além disso, a variável *ramp_v* continua irrelevante para este cenário em questão, portanto, não será alterada. E, por fim, a variável *ref_v* irá chavear para a posição 2, garantindo o modo de operação ilhado, representado pelo modo IV da Figura 12.

Por fim, percebe-se que, enquanto o conversor multifuncional está operando como filtro ativo série, a corrente da rede e a da microrrede apresentam a mesma forma de onda. Mas, do mesmo modo que a tensão, assim que o circuito é chaveado para o modo ilhado, perde-se a corrente da rede. A partir da Figura 27, denota-se que o conversor multifuncional é capaz de suprir a corrente necessária da microrrede quando ocorre a transição para o modo ilhado.

Figura 28 – Formas de onda da corrente na rede (I_S) e microrrede (I_{MR}) com carga



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

4.4.2 Transição do Modo Conectado à Rede para o Modo Ilhado de Maneira Não Intencional.

Nesse tópico, será analisada a situação mais crítica de operação para a microrrede, tendo em vista que é uma condição não programada. A técnica de detecção utilizada é do tipo passiva que monitora o valor eficaz da tensão e frequência da microrrede.

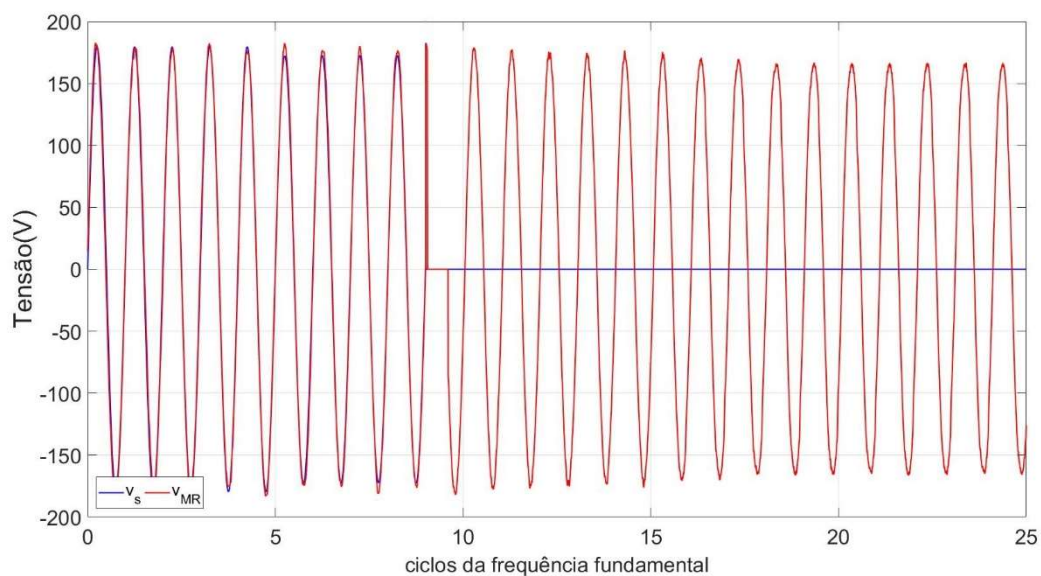
O conversor multifuncional está, inicialmente, com a função de filtro ativo série, provendo suporte à rede com o intuito de regular a tensão e melhorar a qualidade da energia elétrica no PAC da microrrede, como descrito no modo III da Figura 12. Nesta simulação, o bloco responsável pela detecção de ilhamento está ativado e irá funcionar caso a forma de onda de tensão sofra uma variação, seja elevação ou afundamento, de tensão de 10% da sua nominal, ou caso a frequência varie 0,5 Hz à mais ou à menos dos 60 Hz da frequência fundamental. No instante em que isso ocorrer, a microrrede será ilhada, e o conversor multifuncional deixará o modo III, da Figura 12, e assumirá o modo IV, como formador de rede. É importante salientar que há um intervalo de tempo entre a detecção do ilhamento e a abertura da chave estática. Tal intervalo é equivalente à $(0,6/60)$ s. O procedimento proposto está detalhado a seguir:

- $t = 0$ s → O conversor multifuncional conecta a microrrede à rede elétrica do sistema e o bloco responsável pela detecção do ilhamento é ativado;

- $t = (5/60) \text{ s} \rightarrow$ Uma carga linear é conectada ao sistema.
- $t = (9/60) \text{ s} \rightarrow$ A chave S_{rede} é aberta, perdendo-se a conexão com a rede elétrica principal e inicia-se o processo de ilhamento do sistema.
- $t = (9,6/60) \text{ s} \rightarrow$ É finalizado o processo de ilhamento.
- $t = (15/60) \text{ s} \rightarrow$ Uma carga não linear é conectada ao sistema;
- $t = (25/60) \text{ s} \rightarrow$ Fim da simulação.

A partir da análise da Figura 28, percebe-se que, no instante de 9 ciclos da frequência fundamental, a chave SS-MR foi aberta, perdendo-se a detecção da tensão da rede elétrica principal, caracterizando a sua ausência no sistema. A *flag* de detecção do ilhamento é chaveada, sinalizando a perda da rede de alimentação principal e o conversor multifuncional inicia o processo de ilhamento da microrrede. Nesse momento, a chave S_1 é aberta e a chave SS-G é fechada. É importante observar o período de $(0,6/60) \text{ s}$ entre a detecção do ilhamento e a sua ocorrência de fato. Desse modo, o conversor multifuncional que estava funcionando como filtro ativo série passa a operar como formador de rede, o que pode ser comprovado pela forma de onda de tensão apresentada na Figura 29, que remete à tensão de referência gerada pelo conversor multifuncional.

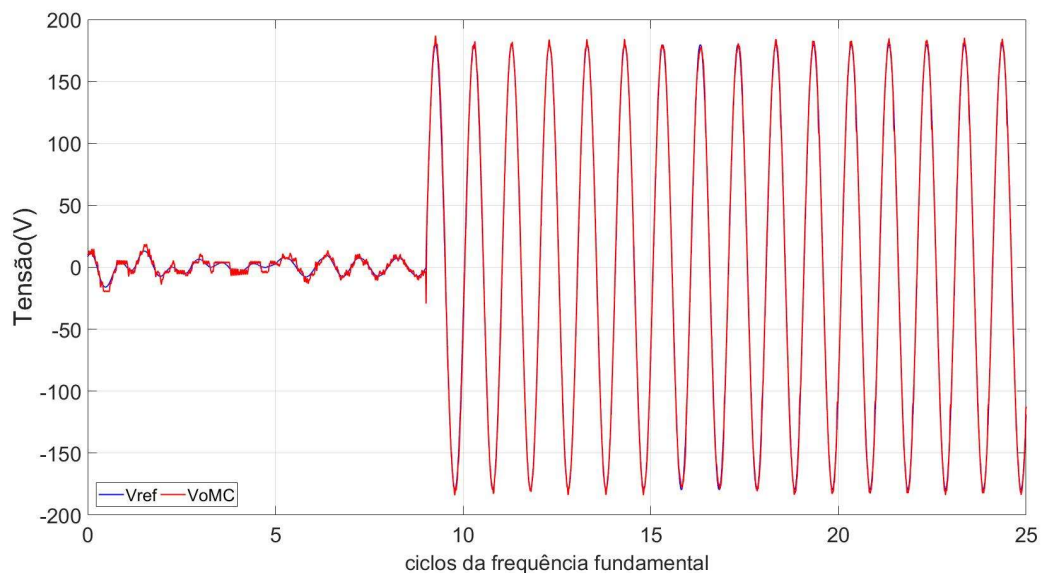
Figura 29 – Formas de onda da tensão na rede (V_s) e no PAC da microrrede (V_{MR}) com carga



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Denota-se que, do mesmo modo que ocorre no cenário anterior, alguns parâmetros do bloco de referência de tensão, exibido na Figura 18, sofreram alterações para possibilitar o chaveamento do modo de operação III para IV, como descrito na Figura 12. No instante em que foi detectado o ilhamento não intencional do sistema, a variável *sinc_pll* chaveou de *Vs* para 0, a variável *ramp_v* continuou irrelevante para esse cenário de atuação e a variável *ref_v* passou de 2 para 3, caracterizando o ilhamento da microrrede. Desse modo, a partir do instante em que a microrrede encontra-se ilhada, sua tensão de referência passa a ser gerada pelo conversor multifuncional, como pode ser observado na Figura 29.

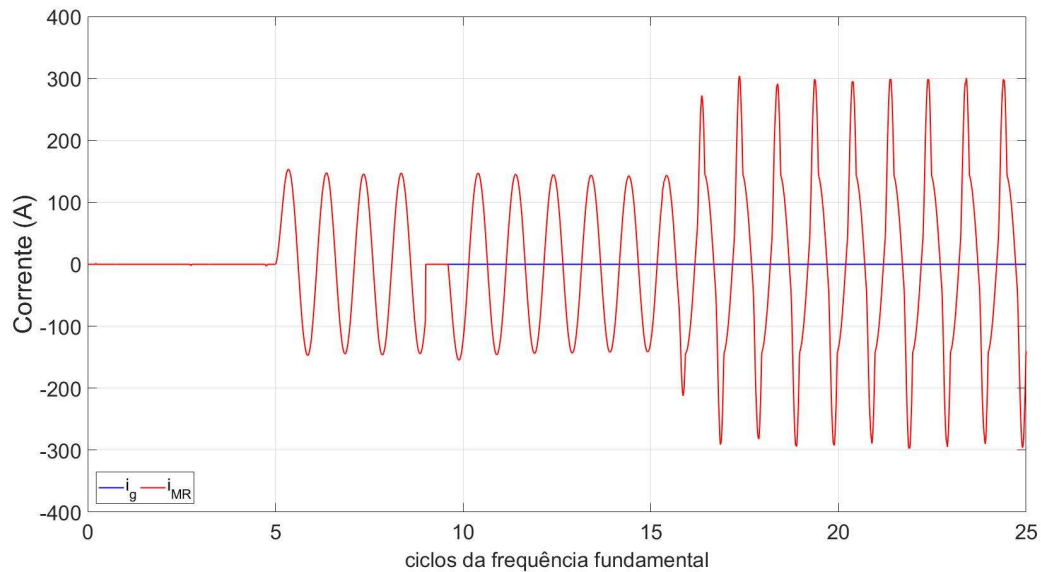
Figura 30 – Formas de onda da tensão de referência (V_{ref}) gerada pelo compensador série e no capacitor do filtro LC (V_{oMC})



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Por fim, observa-se na Figura 30 o formato de onda da corrente na rede e na microrrede, comprovando a atuação do conversor multifuncional como formador de rede quando há o acoplamento de cargas ao circuito.

Figura 31 – Formas de onda da corrente na rede (I_S) e microrrede (I_{MR}) com carga



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

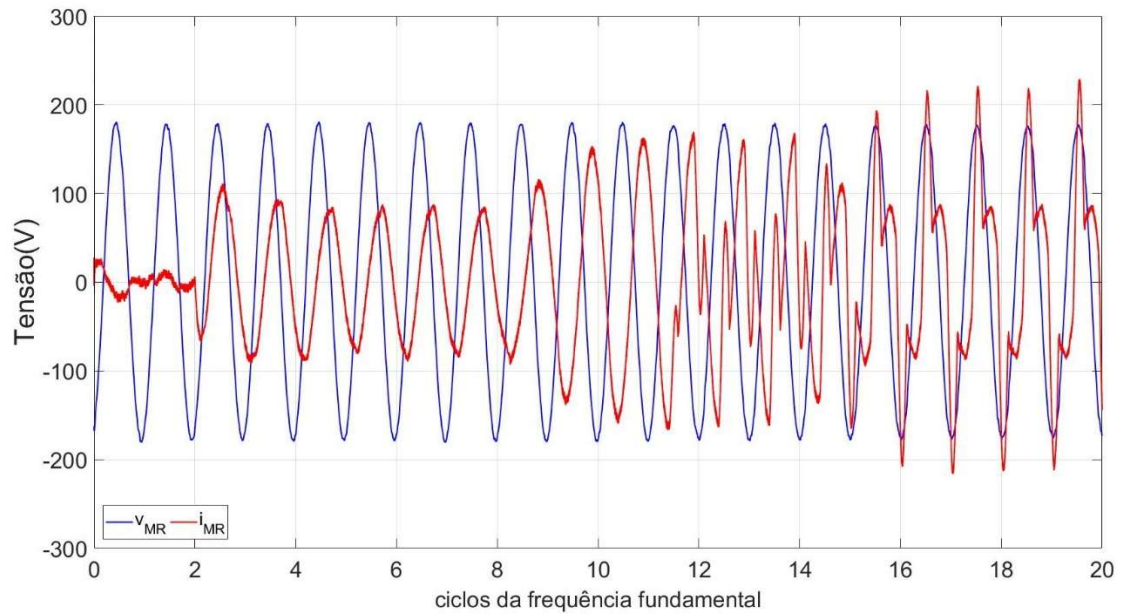
4.5 Cenário III – Operação no Modo Ilhado

Neste cenário, será mostrado a funcionalidade do conversor multifuncional como formador de rede no modo ilhado, modo IV da Figura 12. O procedimento proposto está detalhado a seguir:

- $t = 0 \text{ s}$ → Microrrede ilhada e o PAC da microrrede é energizado pelo conversor multifuncional operando como formador de rede, no modo IV da Figura 12;
- $t = (2/60) \text{ s}$ → Uma carga linear é conectada ao sistema e o supridor de rede é conectado e passa a injetar 10 kW;
- $t = (8/60) \text{ s}$ → O supridor de rede aumenta a injeção de potência para 25 kW;
- $t = (11/60) \text{ s}$ → Uma carga não linear é conectada ao sistema;
- $t = (14/60) \text{ s}$ → O supridor de rede reduz a injeção de potência para 10 kW;
- $t = (20/60) \text{ s}$ → O supridor de rede é desconectado da microrrede e a simulação chega ao fim;

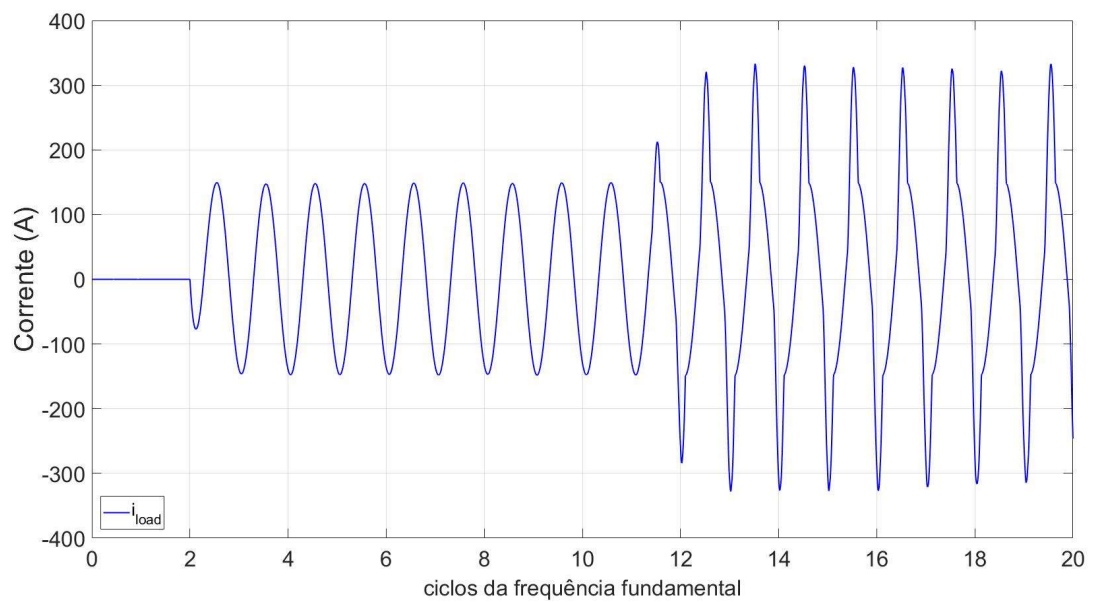
As Figuras 31, 32 e 33 mostram as principais formas de onda de tensão e corrente na microrrede, sendo importante salientar que a forma de onda de tensão no PAC se mantém senoidal, mesmo com a conexão das cargas e do gerador distribuído.

Figura 32 – Formas de onda da tensão (V_{MR}) e corrente (I_{MR}) na microrrede



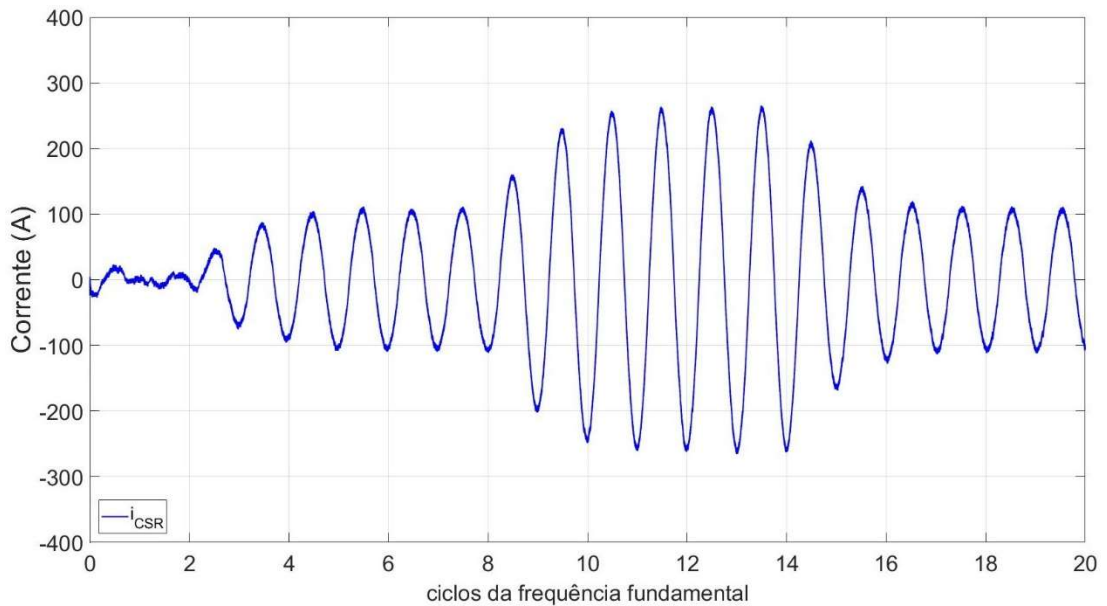
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 33 – Formas de onda da corrente nas cargas linear e não linear (I_{load})



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 34 – Forma de onda da corrente do conversor supridor de rede (I_{CSR})



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

4.6 Cenário IV – Reconexão do Modo Ilhado para o Modo Conectado e Black-Start

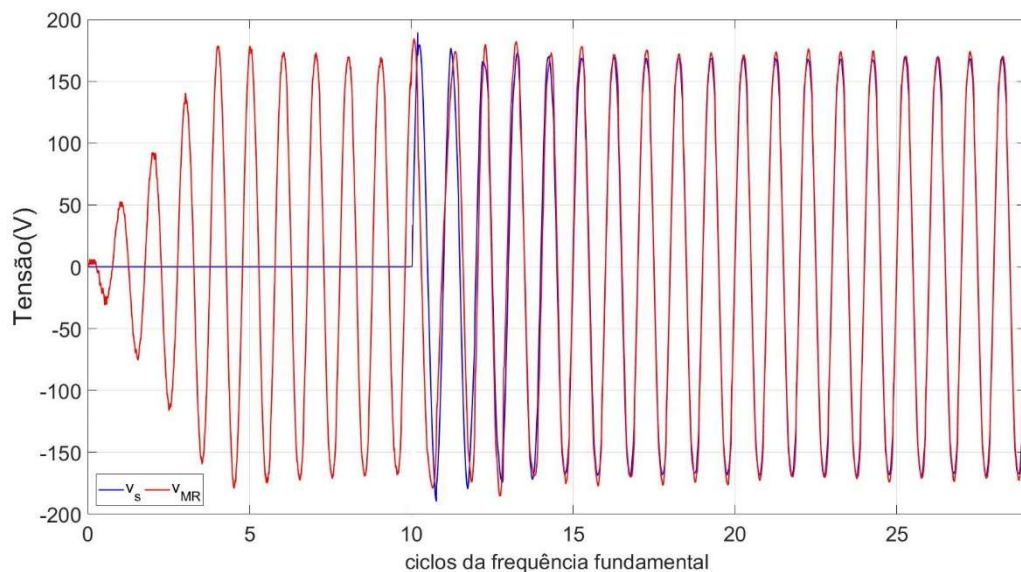
Neste cenário, a rede de alimentação principal encontra-se ausente e a microrrede está ativa, inicialmente, no modo IV da Figura 12, com o conversor multifuncional operando como formador de rede. Também será utilizada a técnica do *black-start*, que consiste na energização da microrrede sem a presença da rede elétrica principal, sendo responsável pelo controle da tensão e da frequência na microrrede. É importante frisar que a sequência de procedimentos durante o *black-start* é realizada pelo CCMR. Em determinado instante, a rede elétrica passa a ficar disponível e o conversor multifuncional inicia a sincronização da tensão da microrrede com a rede elétrica. No instante em que estas tensões se encontram sincronizadas, as chaves S2 e SS-MR são fechadas e a chave SS-G é aberta, reconectando o conversor multifuncional em série com a rede elétrica e, conseqüentemente, esse deixa de operar como formador de rede e assume a função de suporte à rede, atuando como filtro ativo série, reassumindo o modo III da Figura 12. O procedimento proposto está detalhado a seguir:

- $t = 0 \text{ s} \rightarrow$ A microrrede opera no modo ilhado, a rede de alimentação principal não está disponível e o conversor multifuncional inicia a energização do sistema por meio do método do *black-start*;
- $t = (5/60) \text{ s} \rightarrow$ Uma carga não linear é conectada ao sistema;

- $t = (10/60) \text{ s} \rightarrow$ A rede elétrica principal passa a ficar disponível e inicia-se a sincronização dela com a tensão da microrrede;
- $t = (20/60) \text{ s} \rightarrow$ A rede de alimentação e a microrrede estão sincronizadas. Então, as chaves S_2 e $SS-MR$ são fechadas e a chave $SS-G$ é aberta. Desse modo, o conversor multifuncional passa a operar como filtro ativo série, estando no modo III da Figura 12.
- $t = (30/60) \text{ s} \rightarrow$ Fim da simulação.

A partir da forma de onda da tensão na Figura 34, observa-se que o conversor multifuncional foi capaz de energizar a microrrede sem a presença da rede elétrica principal. Tal energização foi realizada por meio da prática do *black-start*, possibilitando uma alimentação gradual por meio de uma entrada em rampa na tensão de referência.

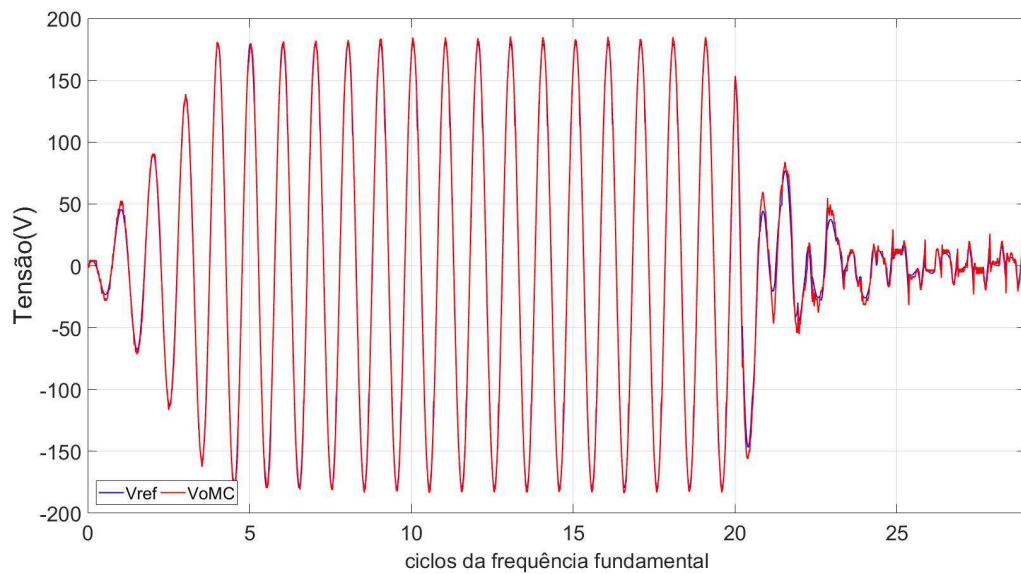
Figura 35 – Formas de onda da tensão na rede (V_s) e no PAC da microrrede (V_{MR}) com carga



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A Figura 35 apresenta a forma de onda da tensão de referência gerada pelo compensador série e no capacitor do filtro LC, de modo a comprovar a eficácia do conversor durante a transição do modo IV para o modo II.

Figura 36 – Formas de onda da tensão de referência (V_{ref}) gerada pelo compensador série e no capacitor do filtro LC (V_{oMC})

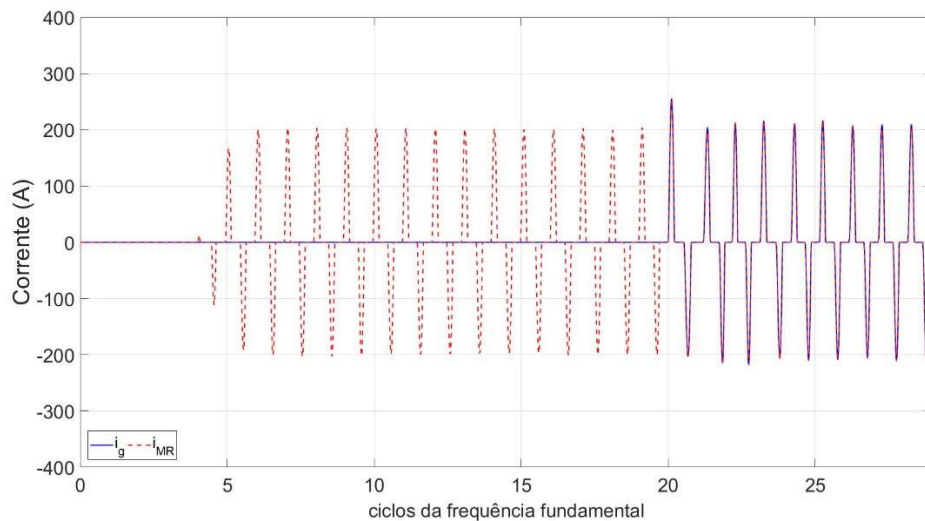


Fonte: Produzido pelo próprio autor.

É importante ressaltar o chaveamento do bloco gerador da tensão de referência representado na Figura 18. A variável $ramp_v$ é inicializada como sendo 1, permitindo a utilização do *black-start* no circuito do sistema. Inicialmente o *sinc_pll* encontra-se na posição 0, então, ele chaveia para a posição Vs, representando a disponibilidade da rede elétrica principal. E, por fim, após a sincronização da rede com a microrrede, e o reposicionamento das chaves explicadas anteriormente, a variável ref_v passa da posição 3 para a posição 1.

Observa-se, da Figura 36, as formas de onda de corrente de rede e da microrrede. É importante salientar que ambas as formas de onda se sobrepõem, tendo em vista que a carga é apenas conectada ao circuito após o conversor multifuncional atingir a função de filtro ativo série.

Figura 37 – Formas de onda da corrente na rede (I_S) e microrrede (I_{MR}) com carga



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

4.7 Comentários sobre os Estudos de Caso

Nesta seção foram apresentados os resultados da operação do conversor multifuncional em uma microrrede CA monofásica com geração distribuída e controle centralizado. Inicialmente, foram apresentadas a topologia e os valores de alguns componentes elétricos que compunham a microrrede, seguido pelo cálculo de outras variáveis essenciais ao circuito, como o filtro LC. Posteriormente a isso, observa-se os resultados provenientes dos quatro principais cenários propostos. No primeiro cenário, o conversor multifuncional opera como filtro ativo série, com função de suporte à rede, onde este estava responsável pela regulação da tensão do sistema, atuando de modo a compensar afundamentos e elevações momentâneos de tensão, além de harmônicos na rede. Posteriormente, no segundo cenário, foram expostos os resultados provenientes da transição da microrrede do modo conectado para o modo ilhado, onde o conversor multifuncional precisa assumir a função de formador de rede, tendo em vista a ausência da rede de alimentação principal. O terceiro cenário trata da operação no modo ilhado e o funcionamento do método do *black-start*, onde o conversor multifuncional é capaz de energizar a microrrede sem a presença de uma fonte de alimentação principal. E, no quarto e último cenário, foi apresentada a reconexão da microrrede à rede elétrica principal, passando do modo ilhado para o modo conectado, onde o conversor multifuncional deixa de operar como formador de rede e reassume sua função de filtro ativo série, retornando à prestação de serviços ancilares à rede.

5 CONCLUSÕES

Neste projeto foi contemplada a aplicabilidade de um conversor multifuncional em uma microrrede de geração distribuída. Foram apresentados, por meio de simulações desenvolvidas no *software Simulink*, dois modos de operação do conversor e suas transições. Para que o projeto fosse desenvolvido, foi criado um modelo de microrrede monofásica composta por uma rede de alimentação, um conversor multifuncional, uma carga elétrica linear e uma não linear.

Inicialmente, foi apresentado um pouco da configuração atual do sistema elétrico brasileiro, como ele é constituído majoritariamente por uma distribuição centralizada e como é abrangente e interessante a possibilidade da introdução da geração distribuída no Brasil. Posteriormente a isso, foi introduzido o conceito básico das microrredes e as suas aplicabilidades no estudo proposto. Foram então definidos os conceitos acerca do conversor multifuncional, sua topologia, configuração, componentes necessários e, por fim, sua aplicabilidade.

No momento em que adentra-se a este estudo em específico, algumas definições foram determinantes para a continuidade das simulações requeridas. A microrrede operou, a todo instante, com o controle centralizado na configuração mestre-escravo, permitindo a obtenção dos resultados posteriores de tensão, corrente e frequência na PAC e suas consequentes análises. Além disso, o conversor multifuncional apresentou dois modos de operação que foram contemplados neste estudo. O primeiro deles foi o de filtro ativo série (suporte à rede), ou modo III, onde ele era responsável pela regulação de tensão no PAC da microrrede, além de compensar elevações e afundamentos de tensão, bem como harmônicos presentes da forma de onda da rede de alimentação principal do circuito. O segundo, e último neste estudo, foi o de formador de rede, ou modo IV, onde o conversor multifuncional forneceu a funcionalidade de *black-start* para a microrrede, suprindo as cargas linear e não-linear, ou seja, ele foi capaz de energizar a microrrede sem a presença da rede de alimentação principal, por meio de um gerador distribuído. Destaca-se também as transições entre modos conectado à rede e ilhado, que podem ocorrer de maneira intencional ou não intencional, onde, em ambos os casos, o conversor multifuncional deixa a função de filtro ativo série e assume a função de formador de rede quase que abruptamente, sendo capaz de continuar fornecendo energia à carga de maneira ininterrupta, apesar da ausência da rede de alimentação principal.

Portanto, os resultados apresentados por meio de simulações mostraram-se promissores no que tange à capacidade de o conversor multifuncional prover diferentes modos de operação e atender à microrrede de acordo com sua necessidade. Isso demonstra a importância do estudo na área de microrrede com controle centralizado e geração distribuída, ainda mais na presença de cargas sensíveis, que necessitam de um compensador série capaz de suprir ininterruptamente a carga do sistema, assumindo a função de uma UPS.

Para trabalhos futuros, propõe-se acrescentar ao conversor multifuncional, enquanto no modo de operação de suporte à rede, a função de limitar a corrente de falta na microrrede, agindo como um filtro ativo série que emula uma impedância série. Outro ponto seria acrescentar a funcionalidade de supridor de rede ao conversor, para isso, seria necessário adaptar o controle dele, de modo a agregar tal funcionalidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, F. V.; SILVA, S. M.; BRITO, J. A.; CARDOSO FILHO, B. J. Analysis and characterization of an active bypass switch for series connected power conditioners. *In: IEEE BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND 1ST SOUTHERN POWER ELECTRONICS CONFERENCE*, 13., 2015, Fortaleza. **Proceedings** [...]. Fortaleza: IEEE, 2015. p. 1-5.

ANDREWS, S.; JOSHI, T. S.; KUMAR, A. S.; MANJU, A. S.; UNNIKRISHNAN, A. K. Modified SRF-PLL to operate under unbalance grid for grid synchronization of DVR. *In: IEEE POWER ELECTRONICS, DRIVES AND ENERGY SYSTEMS*, 4., 2014, Mumbai. **Proceedings** [...]. Mumbai: IEEE, 2014. p. 1-6.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília, DF: ANEEL, ago. 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/módulo-8>. Acesso em: 25 set. 2020.

ANTUNES, H. M. A.; SILVA, S. M.; CARDOSO FILHO, B. J. Análise e Operação de uma Microrrede de Energia Elétrica. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS*, 6., 2016, Natal, RN, **Anais** [...]. Natal, RN: SBSE, 2016. p. 1-6.

ANTUNES, H. M.; SILVA, S. M.; BRANDAO, D. I.; FERREIRA, R. V.; CARDOSO FILHO, B. J. Analysis of a grid-forming converter based on repetitive control in centralized AC microgrid. *In: IEEE POWER ELECTRONICS FOR DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS*, 8., 2017, Florianópolis, **Proceedings** [...]. Florianópolis: IEEE, 2017. p. 1-8.

ANTUNES, H. M. A.; SILVA, S. M.; BRANDAO, D. I.; MACHADO, A. A. P.; CARDOSO FILHO, J. B. A new multifunctional converter based on a series compensator applied to AC microgrids. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, [s. l.; s. n.], v. 102, nov. 2018. p 160-170.

ANTUNES, H. M. A. **Conversor multifuncional reconfigurável e tolerante a falhas para microrredes de energia elétrica**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

ARAFAT, M. N.; PALLE, S.; SOZER, Y.; HUSAIN, I. Transition control strategy between standalone and grid-connected operations of voltage-source inverters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], IEEE, v. 48, n. 5, p. 1516-1525, ago. 2012.

AZEVEDO, G. M.; CAVALCANTI, M. C.; NEVES, F. A.; LIMONGI, L. R.; BRADASCHIA, F. Microgrid Power Converter Control With Smooth Transient Response During The Change Of Connection Mode. **Eletrônica de Potência**, v. 19, n. 3, p. 285-294, jul./ago. 2014.

BELTRAN, H.; GIMENO, F.; SEGUÍ-CHILET, S.; TORRELO, J. M. Review of the islanding phenomenon problem for connection of renewable energy systems. **Renewable Energy and Power Quality Journal**, Valência, Espanha, v. 1, n. 4, p. 1-7, abr. 2006.

BEVRANI, H.; WATANABE, M.; MITANI, Y. **Power System Monitoring Control**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.

BHASKARA, S. N.; CHOWDHURY, B. H. Microgrids - A review of modeling, control, protection, simulation and future potential. *In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2012, San Diego, Proceedings [...]*. San Diego: IEEE, 2012. p. 1-7.

CARASTRO, F.; SUMNER, M.; ZANCHETTA, P.. Mitigation of voltage dips and voltage harmonics within a micro-grid, using a single shunt active filter with energy storage. *In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 32., 2006, Paris. Proceedings [...]*. Paris: IEEE, 2006. p. 2546-2551.

CHEN, S.; LAI, Y. M.; TAN, S. C.; TSE, C. K. Analysis and design of repetitive controller for harmonic elimination in pwm voltage source inverter systems. **IET Power Electronics**. [s. l.], v. 1, n. 4, p. 497-506, dez. 2008.

CHUNG, Y. H.; KIM, H. J.; KIM, K. S.; CHOE, J. W.; CHOI, J. Power quality control center for the microgrid system. *In: IEEE POWER AND ENERGY CONFERENCE, 2., 2008, Johor Bahru. Proceedings [...]*. Johor Bahru: IEEE, 2008. p. 942-947.

CUIYAN, L.; DONGCHUN, Z.; XIANYI, Z. Theory and applications of the repetitive control. *In: SICE ANNUAL CONFERENCE, 1., 2004, Sapporo. Proceedings [...]*. Sapporo: IEEE, 2004. p. 27-34.

DEHNAVI, S. D.; SHAYANI, E. Compensation of voltage disturbances in hybrid ac/dc microgrids using series converter. **Ciencia & Natura**, [s. l.], v. 37, p. 349-356, 2015.

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIĆ, D. **Fundamentals of Power Electronics**. 8. ed. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2001.

FARHADI-KANGARLU, M.; BABAEI, E.; BLAABJERG, F. A comprehensive review of dynamic voltage restorers. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, Elsevier, v. 92, p. 136-155, nov. 2017.

FERREIRA, R. V.; ANTUNES, H. M. A.; MENDES, T.; COSTA, G.; CORTIZO, P. C.; SILVA, S. M. Estudo e simulação de uma microrrede de energia elétrica nos modos conectado e isolado. *In: CONGRESSO SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 10., 2015, [s. l.]. Anais [...]*. [S.l.]: AGRENER, 2015. p. 1-10.

FRANCIS, B. A.; WONHAM, W. M. The internal model principle for linear multivariable regulators. **Applied Mathematics & Optimization**, v. 2, n. 2, p. 170-194, jun. 1975.

GAYATRI, M.; PARIMI, A. M.; KUMAR, A. P. Application of dynamic voltage restorer in microgrid for voltage sag/swell mitigation. *In: IEEE POWER, COMMUNICATION AND INFORMATION TECHNOLOGY CONFERENCE, 1., 2015, Bhubaneswar. Proceedings [...]*. Bhubaneswar: IEEE, 2015. p. 750-755.

HAN, X.; CHENG, R.; WANG, P.; JIA, Y. Advanced dynamic voltage restorer to improve power quality in microgrid. *In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL*

MEETING, 11., 2013, Vancouver. **Proceedings** [...]. Vancouver: IEEE, 2013. p. 1-5.

HOJO, M.; AMO, K.; FUNABASHI, T.; UEDA, Y. A control method of parallel inverter for smart islanding of a microgrid. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY*, 6., 2008, Santander. **Proceedings** [...]. Santander: [s.n], 2008. p. 793-798.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS STANDARDS ASSOCIATION. **IEEE Std 1547.4**: IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems. New York: IEEE, 2011.

KUNTE, R. S.; GAO, W. Comparison and review of islanding detection techniques for distributed energy resources. *In: NORTH AMERICAN POWER SYMPOSIUM*, 40., 2008, Calgary. **Proceedings** [...]. Calgary: IEEE, 2008. p. 1-8.

LASSETER, B. Microgrids [distributed power generation]. *In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING*, 1., 2001, Columbus. **Proceedings** [...]. Columbus: IEEE, 2001. p. 146-149.

LASSETER, R. H. Microgrids. *In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING*, 1., 2002, New York. **Proceedings** [...]. New York: IEEE, 2002. p. 305-308.

LI, Q.; LIU, C.; SHEN, L.; LI, G. Simulation of a dynamic voltage restorer in distribution systems with microgrids. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE POWER GENERATION AND SUPPLY*, 2., 2012, Hangzhou. **Proceedings** [...]. Hangzhou: IET, 2012. p. 1-5.

LOPES, J. A. P.; MOREIRA, C. L.; MADUREIRA, A. G. Defining control strategies for microgrids islanded operation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 2, p. 916-924, maio 2006.

MEDINA, P.; BIZUAYEHU, A. W.; CATALÃO, J. P.; RODRIGUES, E. M.; CONTRERAS, J. Electrical energy storage systems: Technologies' state-of-the-art, techno-economic benefits and applications analysis. *In: IEEE HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES*, 47., 2014, Waikoloa. **Proceedings** [...]. Waikoloa: IEEE, 2014. p. 2295-2304.

MIVEH, M. R.; RAHMAT, M. F.; GHADIMI, A. A.; MUSTAFA, M. W. Power quality improvement in autonomous microgrids using multifunctional voltage source inverters: a comprehensive review. **Journal of Power Electronics**, Seoul, v. 15, n. 4, p. 1054-1065, jul. 2015.

MIYAGI, M.; SHIROMA, Y.; YONA, A.; SENJYU, T.; FUNABASHI, T. Uninterruptible smart house equipped with the phase synchronization control system. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, [s. l.], v. 63, p. 302-310, dez. 2014.

PATRAO, I.; FIGUERES, E.; GARCERÁ, G.; GONZÁLEZ-MEDINA, R. Microgrid architectures for low voltage distributed generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [n. l.], v. 43, p. 415-424, mar. 2015.

POPOV, M.; KARIMI, H.; NIKKHAJOEI, H.; TERZIJA, V. Dynamic Model and Control of a Microgrid with Passive Loads. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS*, 8., 2009, Kyoto. **Proceedings** [...]. Kyoto:[s. n.], 2009. p. 1-6.

REIGOSA, D.; BRIZ, F.; BLANCO, C.; GARCÍA, P.; GUERRERO, J. M. Active Islanding detection for multiple parallel-connected inverter-based distributed generators using high frequency signal injection. *In: ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION*, 7., 2012, [s. l.]. **Proceedings** [...]. [s. l.]: IEEE, 2012. p. 2719-2726.

ROCABERT, J.; LUNA, A.; BLAABJERG, F.; RODRIGUEZ, P. Control of power converters in AC microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 27, n. 11, p. 4734-4749, nov. 2012.

SHAHNIA, F.; GHOSH, A.; LEDWICH, G.; ZARE, F. **Voltage correction in low voltage distribution networks with rooftop PVs using custom power devices**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Queensland University of Technology, Melbourne, 2011.

SHARKH, S. M.; ABU-SARA, M. A.; ORFANOUDAKIS, G. I.; HUSSAIN, B. **Power Electronic Converters for Microgrids**. Singapore City: John Wiley & Sons, 2014.

SILVA, F. S.; RIBEIRO, L. A. D. S.; MATOS, J. G. Bidirectional DC-AC converter for isolated microgrids with voltage unbalance reduction capabilities. *In: IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION*, 7., 2014, Pittsburgh. **Proceedings** [...]. Pittsburgh: IEEE, 2014. p. 4985-4991.

SILVA, A. F. B. O. **Aplicação de controle repetitivo em inversor PWM monofásico com filtro LC de saída utilizado em fonte programável C.A.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2012.

SILVA, F. L. D. **Análise do desempenho de uma microrrede com múltiplas unidades de geração distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2011.

SILVA, S. M.; SILVEIRA, S. É.; REIS, A. S. Analysis of a dynamic voltage compensator with reduced switch-count and absence of energy storage system. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 41, n. 5, p. 1255-1262, oct. 2005.

SILVA, S. M.; CARDOSO FILHO, B. J. Component-minimized voltage sag compensators. *In: IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE*, 37., 2002, Pittsburgh. **Proceedings** [...]. Pittsburgh: IEEE, 2002. p. 883-889.

SILVA, S. M. **Estudo e Projeto de um Restaurador Dinâmico de Tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

SKOCIL, T.; GOMIS-BELLMUNT, O.; MONTESINOS-MIRACLE, D.; GALCERAN-ARELLANO, S.; RULL-DURAN, J. Passive and active methods of islanding for PV systems. *In: EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS*, 13., 2009, Barcelona. **Proceedings** [...]. Barcelona: IEEE, 2009. p. 1-10.

SOSHINSKAYA, M.; CRIJNS-GRAUS, W. H.; GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C. Microgrids: Experiences, barriers and success factors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 659-672, dez. 2014.

SYED, I.; KHADKIKAR, V. A Dynamic Voltage Restorer (DVR) based interface scheme for microgrids. *In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY*, 40., 2014, Dallas. **Proceedings** [...]. Dallas: IEEE, 2014. p. 5143-5149.

TEKE, A.; LATRAN, M. B. Review of multifunctional inverter topologies and control schemes used in distributed generation systems. **Journal of Power Electronics, The Korean Institute of Power Electronics**, v. 14, n. 2, p. 324–340, mar. 2014.

VECHIU, I.; CUREA, O.; LLARIA, A.; CAMBLONG, H. Control of power converters for microgrids. **COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, v. 30, n. 1, p. 300-309, jan. 2011.

WANG, X.; GUERRERO, J. M.; BLAABJERG, F.; CHEN, Z. A review of power electronics based microgrids. **Journal of Power Electronics, The Korean Institute of Power Electronics**, v. 12, n. 1, p. 181-192, dez. 2012.

XU, L; MIAO, Z; FAN, L. Coordinated control of a solar and battery system in a microgrid. *In: IEEE TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION*, 4., 2012, Orlando. **Proceedings** [...]. Orlando: IEEE, 2012. p. 1-7.

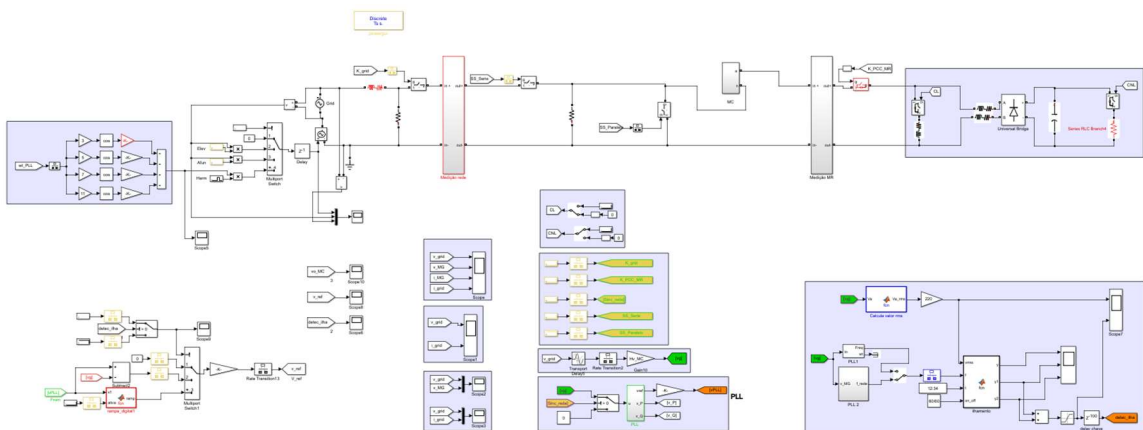
YAZDANI, A.; IRAVANI, R. **Voltage-Sourced Converters Power Systems**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

APÊNDICE A – SIMULAÇÕES UTILIZADAS

Neste apêndice serão mostradas as simulações utilizadas no recorrente trabalho.

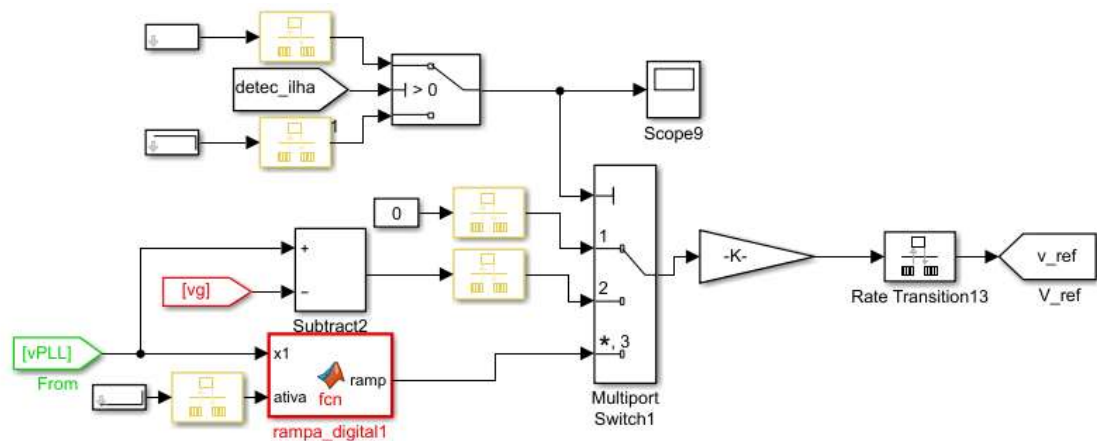
A Figura 38 apresenta a composição completa da simulação utilizada no *software Simulink* para a microrrede no modo conectado. Para serem melhores observados, os componentes serão exibidos individualmente, com exceção dos medidores, que não possuem informações concretas que justifiquem sua exibição. A Figura 39 mostra o controle do conversor multifuncional utilizado. Na Figura 40 é exibida a PLL utilizada. Por sua vez, a Figura 41 mostra as cargas a serem acopladas na microrrede. Por fim, a Figura 42 mostra o conversor multifuncional inserido no sistema.

Figura 38 – Simulação para a microrrede no modo conectado



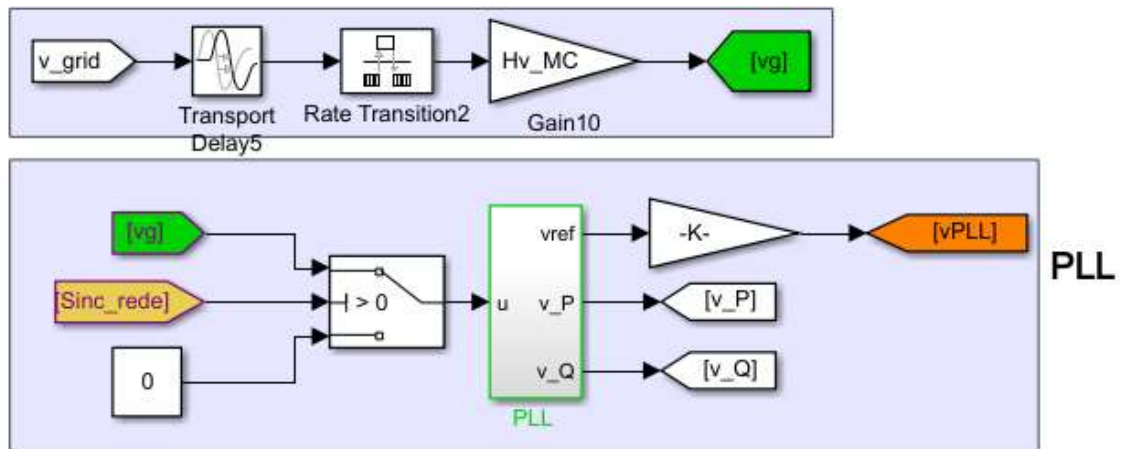
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 39 – Controle do conversor multifuncional



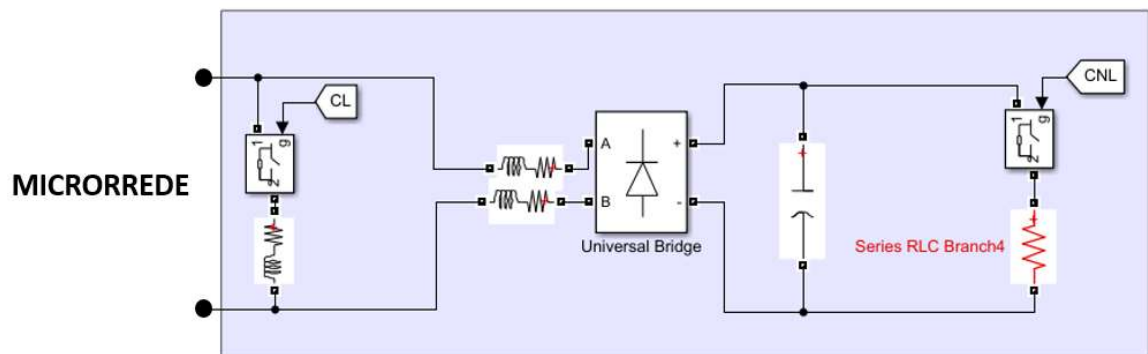
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 40 – Configuração da PLL utilizada



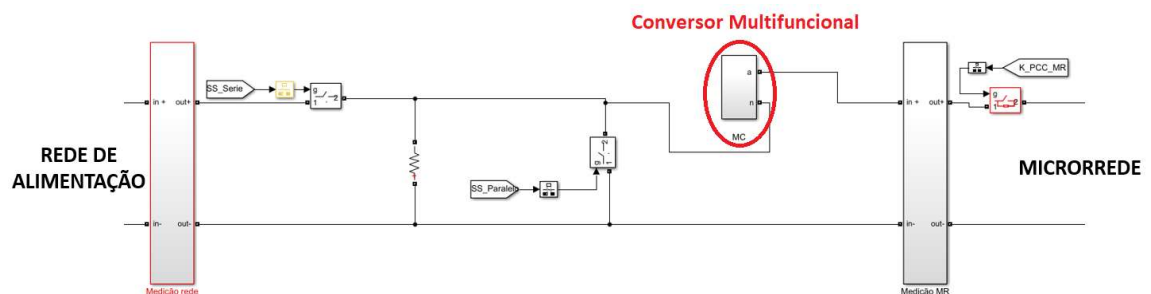
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 41 – Cargas linear e não linear acopladas à microrrede



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 42 – O conversor multifuncional no sistema elétrico proposto

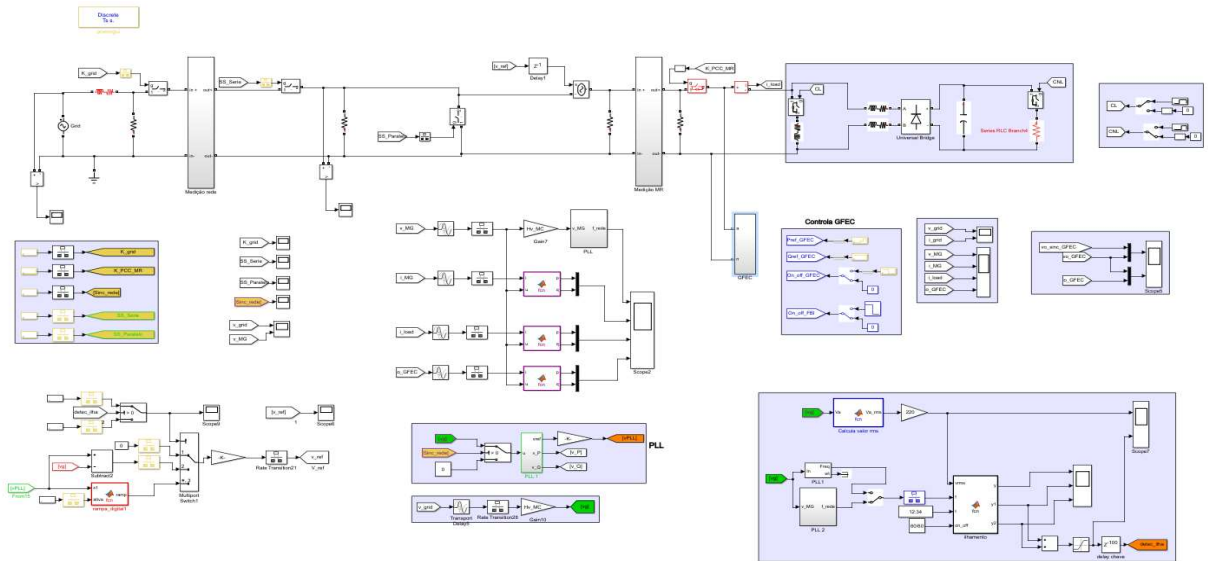


Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A Figura 43 apresenta a composição completa da simulação utilizada no *software Simulink* para a microrrede no modo ilhado. Novamente, serão mostrados os componentes dessa composição em figuras separadas para melhor visualização. Entretanto, o componente do controle do

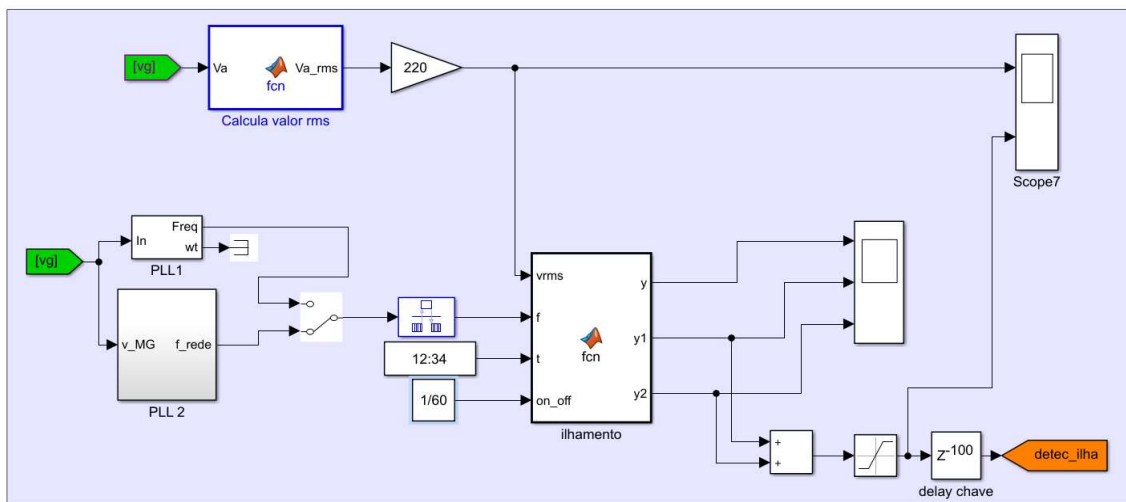
conversor multifuncional, as cargas acopladas à microrrede e a PLL não foram alteradas, desse modo, não serão rerepresentadas. A Figura 44 /g mostra os componentes utilizados para a técnica de detecção do ilhamento. E, por fim, a Figura 45 mostra o conversor multifuncional no sistema elétrico proposto. Vale ressaltar, nesta figura, a presença do CSR, que é a representação do gerador distribuído para o funcionamento no modo ilhado.

Figura 43 – Simulação para a microrrede no modo conectado



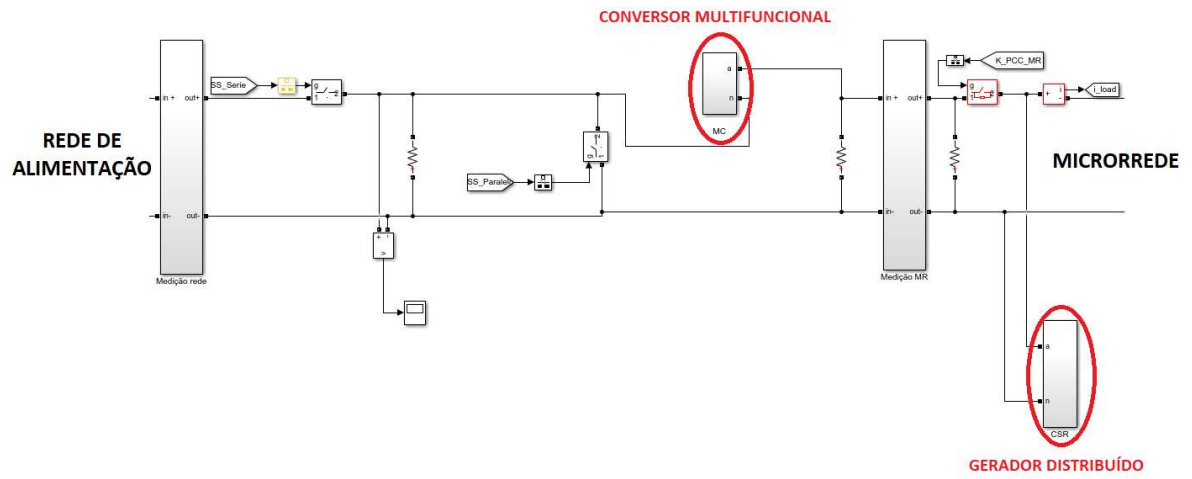
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 44 – Bloco responsável pela detecção de ilhamento



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 45 – O conversor multifuncional no sistema elétrico proposto



Fonte: Produzido pelo próprio autor.